اللجنة الاقتصادية والاجتماعية لغربي آسيا

تكنولوجيات معالجة المياه العادمة

الأمم المتحدة

Distr.
GENERAL

E/ESCWA/SDPD/2003/6
2 October 2003
ORIGINAL: ARABIC/ENGLISH

اللجنة الاقتصادية والاجتماعية لغربي آسيا

تكنولوجيات معالجة المياه العادمة

الأمم المتحدة
نيويورك، ٢٠٠٣

03-0722

تصدير

أصبحت معالجة المياه العادمة قضيّةً حاسمةً أكثر من أي وقتٍ مضى بسبب تضاؤل الموارد المائية، وتزايد تكاليف التخلّص من المياه العادمة، وصدور قوانين أكثر صرامةً من حيث مستويات الملوثات المسموح بها في مجاري الصرف. وتحظى معالجة المياه العادمة في البلدان الأعضاء في الإسكوا بأهمية بالغة لأنها تقع في منطقة من أشد المناطق شحاً في العالم.

ويستهلك قطاع البلديات كمّيات كبيرة من المياه وينتج بالتالي كمّياتٍ هائلة من المياه العادمة، تتكوّن من مياه ونفايات محمولة ناجمة عن المنازل والمؤسسات والمنشآت التجارية والصناعية.

وهذه الدراسة وضعت في موازاة دراسة أخرى أعدّتها الإسكوا باللغة الإنكليزية بالتعاون مع عدد من الخبراء في قضايا معالجة المياه، وتتناول الوسائل والتكنولوجيات المستعملة حالياً في معالجة المياه العادمة، مع التركيز على المياه العادمة البلديّة.

وتتطرّق الدراسة أيضاً إلى إدارة المياه العادمة المعالَجة، وضمنها طرائق إعادة الاستخدام والصرف، وتقدم دراسات حالة لبلدان مختارة من أعضاء الإسكوا، مسلّطة الضوء على استخدامها للمياه واحتياجاتها إلى نظم فعّالة لمعالجة المياه العادمة. وتستطيع بلدان الإسكوا تخفيف استهلاكها من المياه وخفض تكاليف معالجة وصرف المياه العادمة باعتماد وسائل حديثة في منشآت المعالجة. ومن الضروريّ دراسة اقتصاديات وسائل المعالجة المختلفة توخياً لتحديد الحلول الفعّالة من حيث الكلفة. وتخصّص الدراسة فصلاً كاملاً لمقارنة تكاليف تركيب وتشغيل منشآت معالجة المياه العادمة.

المحتويات

الصفحة

المحتويات (تابع)

الصفحة

قائمة الجداول

المحتويات (تابع)

الصفحة

قائمة الأطر

قائمة الأشكال

مسرد المصطلحات

تكوين الحامض	acidogenesis
امتزاز	adsorption
ركم مهوّى راكد	aerated static pile
سَدود للهواء	airtight
شبّ	alum
هضم لا هوائي	anaerobic digestion
تحكم نظيري	analog control
أنيونات أو الشوارد السالبة	anions
عمليّات بنقص الأكسجين	anoxic processes
مواد مانعة للتحرشف	antiscalant
تمثل	assimilation
عمليّات بيولوجية تكون متعضّيات صغريّة فيها مثبّتةً على سطح	attached-growth systems
تحكم آلي	automatic control
خط الأساس	baseline
مِكبس ترشيح حزامي	belt filter press
بيكربونات قلويّة	bicarbonate alkalinity
الطلب البيوكيميائي على الأكسجين	biochemical oxygen demand BOD
نمو بيولوجي	biological growth
ماء أخضم	brackish water
كتيونات أو الشوارد الموجبة	cations
فرز بالطرد أو النبذ	centrifugation
فرّازة للطرد أو النبذ	Centrifuge
الطلب الكيميائي على الأكسجين	chemical oxygen demand COD
كلوريدات	chlorides
بكتيريا الكوليفورم	Coliforms
طبيعة غروانية للجبلة	colloidal nature of the protoplasm
عمليّات مزدوجة	combined processes
طحن	comminution
تسميد	composting
ترسيب انضغاطي	compression settling
تقدير المستوى التصوّريّ	conceptual level estimate
تكييف	conditioning
أراضي رطبة اصطناعية	constructed wetlands
خزّان تلامس	contacting basin
أنظمة مستمرّة	continuous systems
تآكل	corrosion
أنظمة إلتقاط بيانات	data acquisition systems
إزالة النترتة	denitrification
نزح أو إزالة الماء	dewatering

مسرد المصطلحات (تابع)

هضم	digestion
تحكم رقمي	digital control
مقسوم أو مفتت أو متقطع	discrete
أنظمة متقطّعة	discrete systems
عوامل تشتيت	dispersants
تجفيف	drying
تصويل	elutriation
أنظمة خبيرة	expert systems
تحليل صحيح إلى العوامل	factorization
بكتيريا كوليفورم غائطية	fecal coliforms
دارات تحكم مرتدّة	feedback control loops
دارات تحكم مقدميّة	feed-forward control loops
كلوريد الحديد	ferric chloride
أملاح الحديد	ferric iron salts
كبريتات الحديد	ferric sulphate
كبريتات الحديدي	ferrous sulphate
زجاج ليفي	fiberglass
متعضّيات صغريّة خيطيّة	filamentous microorganisms
مِكبس ترشيح	filter press
مروّق نهائي	final clarifier
حجم ثابت	fixed volume
مفاعلات ذات غشاء ثابت	fixed-film reactors
تجفيف ومضي	flash drying
نباتات مائية عائمة	floating aquatic plants
ملبّد	flocculant
تلبّد	Flocculation
تعويم	flotation
معادلة الدفق	flow equalization
ديناميكا الموائع	fluid dynamics
إرغاء	foaming
حشف	fouling
أنظمة تحكم مشوّشة	fuzzy control systems
تركيب غروانى	gel structure
سلبيّة الـ "جرام"	Gram-negative
حُبَيبيّ	granular
منطقة تصريف ثقلي	gravity drainage zone
حجرة حصى	grit chamber
نزع حصى	grit removal
ترسيب معاق	hindered settling

مسرد المصطلحات (تابع)

دفق أفقي	horizontal flow
تحلل بالماء	Hydrolysis
هدروكسيدات	hydroxides
رصّ	impaction
حرق	incineration
سطح منحني	inclined surface
اعتراض	interception
معدّل عائدات داخلي	internal rate of return
تسميد داخل وعاء	in-vessel composting
تبادل أيوني	ion exchange
معالجة أرضية	land treatment
كلس	lime
ميثان	methane
تكوين بالميثان	methanogenesis
ترشيح ميكروي	Microfiltration
موجات صغريّة	microwave
ملي أمبير	milliamp
كتلة جزيئيّة	molecular mass
تجفيف متعدّد المَجمَرات	multiple-hearth drying
ناشرة متعدّدة الفوهات	multiport diffuser
ترشيح نانوي	nanofiltration
صافي القيمة الحالية	net present value
شبكات عصبية	neural networks
نترات	nitrates
نترتة	nitrification
تقدير الحجم	order-of-magnitude
بوليمرات عضوية	organic polymers
فيض	Overflow
جريان سطحي	overland flow
قناة أكسدة	oxidation ditch
عوامل ممرضة	pathogens
فترة تسديد	payback period
فوسفات	Phosphates
جريان صمّي	plug-flow
مبادلة ملوّثات	pollutant trading
بولي إلكتروليتات	polyelectrolytes
تكييف بوليمري	polymer conditioning
بولستَيرين	polystyrene
كلوريد متعدّد الفاينل	polyvinyl chloride PVC

مسرد المصطلحات (تابع)

عمليّات البِرَك	pond processes
كائنات وحيدة الخلية	protozoa
أمد النبض	pulse duration
انحلال حراري	Pyrolysis
ترشيح سريع	rapid infiltration
راتنج أو راتينة	Resin
التناضح العكسي	reverse osmosis
تجفيف دوّار	rotary drying
الملامِسات البيولوجية الدوّارة	rotating biological contactors
تقشّر	scaling
ترسيب	sedimentation
سلخ	sloughing
معدّل بطيء	slow rate
تنفّخ حجمي للحمأة	sludge bulking
وِطاء تربة	soil matrix
تلامس مادة صلبة	solid contact
تجفيف رذيّ	spray drying
بركة تثبيت	stabilization pond
احتراق قليل الهواء	starved air
تصفية	straining, screening
كبريتات	sulfates
كبريتيدات	Sulfides
التحكم الإشرافي على حيازة المعطيات (سكادا)	Supervisory Control and Data Acquisition SCADA
تهوية سطحية	surface aeration
عمليّات بيولوجية تكون فيها المتعضّيات الصغريّة معلّقةً في السائل	suspended-growth systems
تكثيف	Thickening
نغمة	tone
عناصر نزرة	trace elements
مرشح نضّاض	trickling filter
ترشيح فائق الدقّة	Ultrafiltration
مرشح خوائي	vacuum filter
حجم متغيّر	variable volume
مفاعلات ذات ماسورة رأسية	vertical tube reactors
أكسدة بهواء رطب	wet-air oxidation
ركم الرياح	windrow

مقدمة

تتكوّن المياه العادمة البلديّة من نفايات سائلة أو محمولة تنتجها المرافق الصحية في المنازل والمؤسسات والمنشآت التجارية أو الصناعية، بالإضافة إلى مياه جوفية وسطحية ومياه الأمطار.

وتحتوي المياه العادمة غير المعالجة على كميات كبيرة من المواد العضوية والمتعضّيات الصغرية بالإضافة إلى المغذيات والمركبات السامة، التي تشكل أخطاراً بيئية وصحية. ولذلك لابد من نقل المياه العادمة سريعاً من مصادرها ومعالجتها على نحوٍ ملائم قبل صرفها. والهدف النهائي من إدارة المياه العادمة حماية البيئة بطريقة تتناسب مع شروط الصحة العامة والمسائل الاقتصادية والاجتماعية[1].

وإزاء الطبيعة الجافة التي تسيطر على بلدان الإسكوا عموماً، تتخذ معالجة المياه العادمة أهمية بالغة فيها.

وتقع هذه الدراسة في سبعة فصول، أولها يصف بإيجاز طبيعة المياه العادمة البلدية ويحدّد الملوّثات الموجودة فيها عادة؛ والفصل الثاني يصف مختلف تكنولوجيات معالجة المياه العادمة المستخدمة حالياً ويتضمن تفاصيل فنية حول طرائق وتطبيقات المعالجة وصرف الحمأة؛ والفصل الثالث يتضمن عرضاً عن إدارة المياه المعالجة وطرائق إعادة استخدامها وصرفها؛ والفصل الرابع يصف تقنيات وأجهزة التحكم المستخدمة في منشآت معالجة المياه العادمة؛ والفصل الخامس يكرس لاقتصاديات معالجة المياه العادمة، مع تفاصيل حول تكاليف التركيب والتشغيل حسب طريقة المعالجة؛ والفصل السادس يتضمن دراسات حالة لبلدان مختارة من أعضاء الإسكوا تشمل الأردن والكويت ولبنان ومصر واليمن، وتبيّن الوضع الحالي من حيث الجهود المبذولة لمعالجة المياه العادمة، وتعرض الخطط المستقبلية لتطوير منشآت معالجة المياه العادمة؛ والفصل السابع يعدّد التوصيات مركّزاً على الجهود التي ينبغي بذلها في منطقة الإسكوا لتحسين إعادة استخدام المياه وضرورة اتباع استراتيجية متكاملة ومتعدّدة التخصّصات لإدارتها.

---

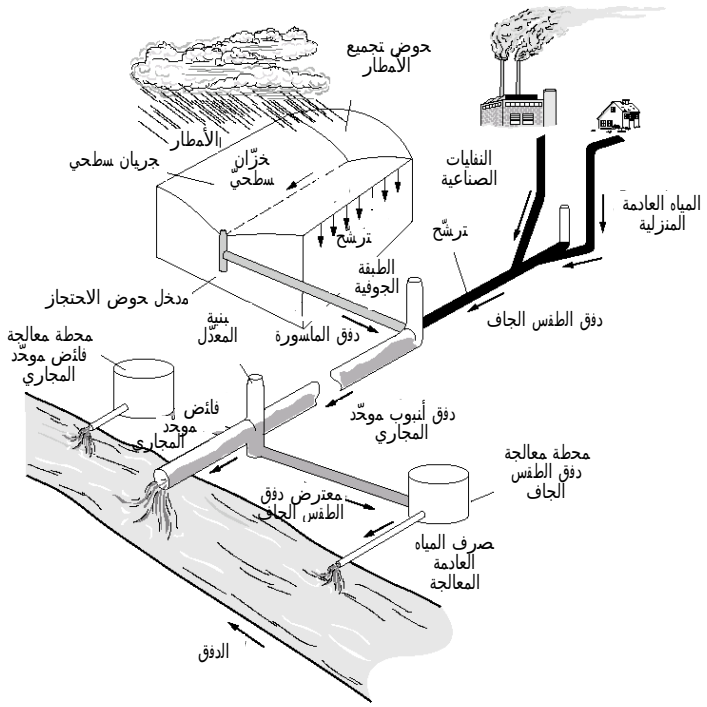
(١) Metcalf & Eddy, Inc., *Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse*. 3rd ed. New York, McGraw Hill, 1991.

أولاً- طبيعة المياه العادمة البلدية

يرتكز تصميم وحدات معالجة المياه العادمة واختيار تكنولوجيا فعّالة للمعالجة على فهم طبيعة الميـاه العادمة. فهذه المياه تنشأ من المياه المستخدمة في المنازل والمؤسسات والمرافق الصـناعية، ومـن ميـاه الأمطار والمياه الجوفية والسطحية (الشكل ١). ويتفاوت دفق المياه العادمة حسب مستوى استخدام الميـاه، الذي يتعلق بعوامل عدّة، منها المناخ، وحجم المجتمع ومستوى المعيشة، ونوعية إمـدادات الميـاه وكلفتهـا وممارسات الحفاظ عليها، ومستوى التصنيع، وضغط الإمداد.

وتُحدد نوعية المياه العادمة حسب خصائصها الفيزيائيـة والكيميائيـة والبيولوجيـة. فالخصـائص الفيزيائية تشمل اللون والرائحة والحرارة والتعكّر، والمحتويات غير المذابة، ومنها الأجسام الصلبة والـنفط والشحم، والأجسام الصلبة تصنّف إلى جوامد معلقة وجوامد مُذابة وأجزاء عضوية متطايرة وغير عضـوية ثابتة.

الشكل ١- مصادر المياه العادمة



المصدر: Metcalf and Eddy, Inc., *Wastewater engineering: treatment and reuse*. 4th ed. New York, McGraw Hill, 2002.

والخصائص الكيميائية المرتبطة بالمحتويات العضوية للمياه العادمة تشمل الطلب البيولوجي الكيميائي على الأكسجين، والطلب الكيميائي على الأكسجين، ومجموع الكربون العضـوي، والطلـب الكلـي علـى الأكسجين؛ أمّا الخصائص الكيميائية غير العضوية فتشمل الملوحة والعُسر والرقم الهيدروجيني والحموضـة والقلوية، بالإضافة إلى المعادن المؤيّنة، ومنها الحديد والمنغنيز، والكيانات الأنيونيـة، ومنهـا الكلورينـات

والكبريت والنترات والكبريتيد والفوسفات؛ والخصائص البكتيريولوجية تضمّ بكتيريا الكوليفورم وبكتيريا الكوليفورم الغائطية والعوامل الممرضة والفيروسات. وتتغيّر مكوّنات المياه العادمة ومستويات التركيز مع الوقت وحسب الظروف المحلية، فمجموع الأجسام الصلبة النموذجي للمياه المنزلية غير المعالجة، مثلاً، يتراوح بين ٣٥٠ و١ ٢٠٠ مليغرام/ليتر بينما يتراوح الطلب البيولوجي الكيميائي على الأكسجين بين ١١٠ و٤٠٠ مليغرام/ليتر[٢].

وتتشعّب آثار صرف المياه العادمة غير المعالجة في البيئة حسب نوع الملوّثات وتركيزها، ويوضح الجدول ١ الملوثات الهامة الموجودة في المياه العادمة. فالأجسام الصلبة المعلقة، مثلاً، تؤدّي إلى ترسّب الحمأة وتوليد ظروف لاهوائية، بينما تؤدّي المواد العضوية غير القابلة للتحلّل الحيوي إلى استنفاد موارد الأكسجين الطبيعية ونشوء ظروف ضارة بالأنواع المائية[٣].

الجدول ١- الملوثات الهامة الموجودة في المياه العادمة

الملوّثات	سبب الأهمية
الأجسام الصلبة المعلقة	قد تؤدّي إلى ترسّب الحمأة وتوليد ظروف لا هوائية إذا صُرفت المياه العادمة غير المعالجة في البيئة المائية.
المواد العضوية غير القابلة للتحلل الحيوي	تتكوّن أساساً من البروتينات والكربوهيدرات والدهون وتُقاس عادةً باستخدام الطلب البيولوجي الكيميائي على الأكسجين والطلب الكيميائي على الأكسجين. وبسبب ثباتها البيولوجي، وتؤدّي هذه المواد إذا أُلقيت في المياه الداخلية، إلى استنفاد موارد الأكسجين الطبيعية ونشوء ظروف ضارة بالأنواع المائية.
الكائنات المُمرضة	قد تسبّب أمراضاً معوية.
الملوّثات ذات الأولوية	تضمّ مركّبات عضوية وغير عضوية، وقد تكون سمّيّة وسرطانية ومولّدة للتغييرات الوراثية أو التشوهات الخلقية.
المواد العضوية الشديدة المقاومة	تقاوم طرائق المعالجة التقليدية للمياه العادمة، وتضمّ العوامل ذات الفعالية السطحية والفينولات والمبيدات الزراعية.
المعادن الثقيلة	تنتج من الأنشطة التجارية والصناعية. ويجب إزالتها من المياه العادمة قبل إعادة استخدامها.
المكوّنات المذابة غير العضوية	تضمّ الكالسيوم والصوديوم والكبريتات، وتضاف غالباً إلى المياه المعدّة للاستخدام المنزلي ويجب إزالتها لإعادة استخدام المياه العادمة.

المصدر: مقتبس من: Metcalf and Eddy, Inc., *Wastewater engineering*, 3rd ed.، مرجع سبق ذكره.

(٢) المرجع نفسه.

(٣) المرجع نفسه.

ثانياً- تكنولوجيات المعالجة المستخدمة حالياً

تُزال الملوّثات من المياه العادمة بوسائل فيزيائيـة وكيميائيـة وبيولوجيـة، وبالأنظمـة الطبيعيـة. وتحقيقاً لمستويات مختلفة من المعالجة، تُدمج الوسائل المتنوّعة في أنظمة تُصنّف في ثـلاث فئـات: أوليـة وثانوية ومتقدّمة. وتشمل المعالجة الصارمة للمياه العادمة إزالة ملوّثات محدّدة وإزالة المغـذيات والـتحكّم بمستوياتها. وتعالج الحمأة الناجمة عن عمليّات معالجة المياه العادمة باستخدام طرائق عـدة بغيـة خفـض محتوياتها من المياه والمواد العضوية وجعلها مناسبة للصرف النهائي أو إعادة الاسـتخدام. ويصـف هـذا الفصل من الدراسة مختلف التكنولوجيات التقليدية والمتطوّرة وتطبيقاتها في معالجةٍ فعّالـة للميـاه العادمـة البلديّة.

ألف- طرائق معالجة المياه العادمة

تتنوّع عمليات معالجة المياه العادمة بين فيزيائية وكيميائية وبيولوجية. ويبيّن الشكل العمليات التـي تندرج في كل فئة.

الشكل ٢- عمليات معالجة المياه العادمة

١- العمليات الفيزيائية

بدأ استخدام العمليّات الفيزيائية منذ زمنٍ طويل ولا تزال أساساً لمعظم أنظمة المعالجـة. وتصـف الفقرات التالية أكثر هذه العمليّات شيوعاً.

(أ) التصفية

تؤدّي تصفية المياه العادمة إلى إزالة الملوّثات الكبيرة الحجم بهدف حماية معدّات أسفل المجرى ومنع المواد العائمة من دخول خزّانات الترسّب. وتتألّف أجهزة التصفية من قضبان متوازية أو شبكة أسلاك أو صفائح مثقوبة أو غيرها[٤]. ويجري التخلص من المواد المزالة بالتصفية إمّا عن طريق دفنها أو حرقها أو إرجاعها إلى دفق المياه العادمة بعد تنقيتها[٥].

وتصنّف المصافي حسب حجم الفتحات في أربع فئات أساسية: المصافي الخشنة والدقيقة والفائقة الدقة والميكروية (الجدول ٢). فالمصافي الخشنة مثلاً تضمّ المصافي ذات القضبان وشبكات تصفية النفايات، التي يمكن تنظيفها بوسائل يدوية وميكانيكية. وتضمّ المعايير المستخدمة في تصميم المصافي الخشنة حجم القضبان وتباعدها وانحناءها، وعرض القناة، وسرعة الدفق[٦].

الجدول ٢- أنواع المصافي

(٤) المرجع نفسه.

(٥) المرجع نفسه.

D.H.F. Liu and B.G. Liptak. *Wastewater treatment*. Florida, Lewis, 1999.

(٦) Water environment Federation (WEF) and American Society of Civil Engineers (ASCE), *Design of municipal wastewater treatment plants (Volume 1),* WEF Manual of Practice No.8 and ASCE Manual and Report on Engineering Practice No 76, Vermount, Book Press, Inc., 1992.

فئات المصافي	حجم الفتحات (مم)	التطبيق	أنواع المصافي
المصافي الخشنة	≥ ٦	إزالة الجوامد الكبيرة والحطام	• المصافي ذات القضبان وشبكات تصفية النفايات المنظّفة يدوياً • المصافي ذات القضبان وشبكات تصفية النفايات المنظّفة ميكانيكياً ○ تنظيف أمامي أو خلفي مُدار بسلسلة أو بكابل ○ مصافي تردّدية كالمشط ○ مصافي متسلسلة ○ مصافي متواصلة ذاتية التنظيف
المصافي الدقيقة	٦-١,٥	خفض الجوامد المعلقة لمستوى يناسب المعالجة الأولية	• مصافي ذات اسطوانات دوّارة • مصافي ذات اسطوانات دوّارة مع دفق داخلي وخارجيّ • مصافي ذات اسطوانات دوّارة عمودية • مصافي ذات اسطوانات دوّارة منحنية • مصافي مياه متنقّلة • مصافي ذات شريط متّصل • مصافي هزّازة
المصافي الفائقة الدقة	١,٥-٠,٢	خفض الجوامد المعلقة لمستوى يناسب المعالجة الأولية	
المصافي الميكروية	٠,٣-٠,٠٠١	تحسين المياه المعالجة ثانوياً لمعيار المعالجة المتقدمة	

المصادر: - مقتبس من: Liu and Liptak، مرجع سبق ذكره.

- Water Environment Federation and American Society of Civil Engineers، مرجع سبق ذكره.

والمصافي الدقيقة تستخدم عدة أنواع من الوسائط، ضمنها الصفائح المثقوبة وشبكات الأسلاك وقماش الأسلاك المنسوجة. وبسبب فتحاتها الدقيقة، من الضروري تنظيف هذه المصافي باستمرار باستخدام فرشاة أو مبشرة أو تدفق مياه أو بخار أو هواء. وتعتمد فعالية المصافي الدقيقة على دقة الفتحات وسرعة الدفق(٧).

(ب) التفتيت

تسحق المفتتات المواد الكبيرة العائمة في دفق المياه، وتستخدم عادة عندما يكون استعمال المصافي غير عملي، بين حجرة الحصى وخزّانات الترسيب الأوّلية، وتخفف انبعاث الروائح والذباب وتساعد على تحسين المنظر. وتُقسم المفتتات إلى فئات حسب حركة القاطعات التي يمكن أن تكون دوّارة أو مترجحة. وتتضمّن المفتتات ذات القاطعات الدوّارة مصفاةً ثابتةً أو متحرّكةً مع القاطعات(٨).

(ج) معادلة الدفق

تستعمل تقنية معادلة الدفق لتحسين فعالية عمليّات المعالجة الثانوية والمتطوّرة عن طريق تسوية متغيرات العمليّات، ومنها الدفق ومستويات الملوّثات والحرارة، خلال فترة من الزمن. ويؤدّي تضييق

(٧) Liu and Liptak، مرجع سبق ذكره.

(٨) المرجع نفسه.

الفروق والوصول إلى معدّل دفق شبه ثابت إلى تخفيف آثار هذه المتغيرات في أسفل المجرى. ويمكن استخدام معادلة الدفق في أماكن عدّة في محطة معالجة المياه العادمة، ومنها النقاط قبل الصرف إلى جسمٍ مائيّ، وقبل عملية المعالجة المتقدّمة[٩]، ويتضمن الشكل ٣ أربع عمليّات أساسية لمعادلة الدفق.

الشكل ٣- العمليّات الأساسية لمعادلة الدفق

المصدر: مقتبس من: Liu and. Liptak، مرجع سبق ذكره.

(د) الترسيب

يُعتبر الترسيب عملية أساسية وشائعة الاستخدام في معالجة المياه العادمة. وهذه العملية تتضمّن الترسيب بالجاذبية للجسيمات الثقيلة المعلقة في الخليط، وتستعمل لإزالة الحصى والجسيمات في خزّان الترسيب الأوّلي، والطافيات البيولوجية في خزان ترسيب الحمأة المنشّطة، والطافيات الكيميائية عندما تستخدم عملية التخثير الكيميائي. ويتضمن الجدول ٣ مقارنة لفعالية النزع في الترسيب العادي والكيميائي.

الجدول ٣- مقارنة فعالية النزع بالترسيب العادي والكيميائي

المتغيرات	نسبة النزع	
	الترسيب العاديّ	الترسيب الكيميائي
مجموع الأجسام الصلبة المعلقة	٩٠-٤٠	٩٠-٦٠
الطلب البيولوجي الكيميائي على الأكسجين	٤٠-٢٥	٧٠-٤٠
الطلب الكيميائي على الأكسجين	-	٦٠-٣٠
الفوسفور	١٠-٥	٩٠-٧٠
الحمولة البكتيرية	٦٠-٥٠	٩٠-٨٠

(٩) المرجع نفسه.

المصدر: Water Environment Federation and American Society of Civil Engineers، مرجع سبق ذكره.

ويجري الترسيب في خزّانات متعدّدة التصاميم، منها خزانات الدفق الأفقي وتلامس المـادة الصـلبة والسطح المنحني[١٠]. وعند تصميم خزّانات الترسيب، من الأهمية الحصول على مياه خارجة نقيـة وحمـأة مكثفة. ويصنّف الترسيب، حسب كثافة الجسيمات، ضمن أربعة أنواع هي: الترسـيب بالتفتيـت، وبالتلبّـد، وبالإعاقة، والانضغاط. ويمكن حصول أكثر من نوع واحد من هذه الأنواع ضمن عملية الترسيب الواحدة.

(•) التعويم

تستخدم عملية التعويم لإزالة الجسيمات الصلبة أو السائلة من الطور السـائل بإدخـال غـاز نقـيّ كفقاقيع الهواء. وتلتصق فقاقيع الغاز بالسائل أو تُحبس في جسيمات المواد الصـلبة، بحيـث تزيـد القـوة الدافعة التعويميّة لمزيج الجسيمات والفقاقيع. وبهذه الطريقة، تطفو الجسيمات التي تكون أشـد كثافـة مـن السائل بحيث تُزال بالكشط. وفي معالجة المياه العادمة، يُستعمل التعويم لإزالة المواد المعلقة ولتكثيف الحمأة البيولوجية. ويتميّز التعويم عن الترسيب بإمكان إزالة الجسيمات الصغيرة والخفيفة بالكامـل وفـي وقـت أقصر. وبالإضافة إلى ذلك، يمكن إدخال عدّة مضافات كيميائية لتحسين عملية النزع[١١]، ويصف الجدول ٤ طرائق التعويم المختلفة.

الجدول ٤- طرائق التعويم المختلفة

الطريقة	وصف الطريقة
التعويم بالهواء المذاب	يحقن الهواء بينما تكون المياه العادمة تحت ضغط ضمن عدّة وحدات. وبعـد زمـن اسـتبقاء قصير، يُعاد الضغط إلى المستوى الجوّي بحيث يُطلق الهواء فقاقيع صغيرة.
التعويم بالهواء	تتضمّن هذه الطريقة إدخال غاز إلى الطور السائل مباشرةً عبر دفاعة مروحيّـة أو ناشـرات بمستوى الضغط الجوّي.

(١٠) Metcalf and Eddy, Inc., *Wastewater engineering*. 3rd ed، مرجع سبق ذكره.

(١١) المرجع نفسه.

الجدول ٤ (تابع)

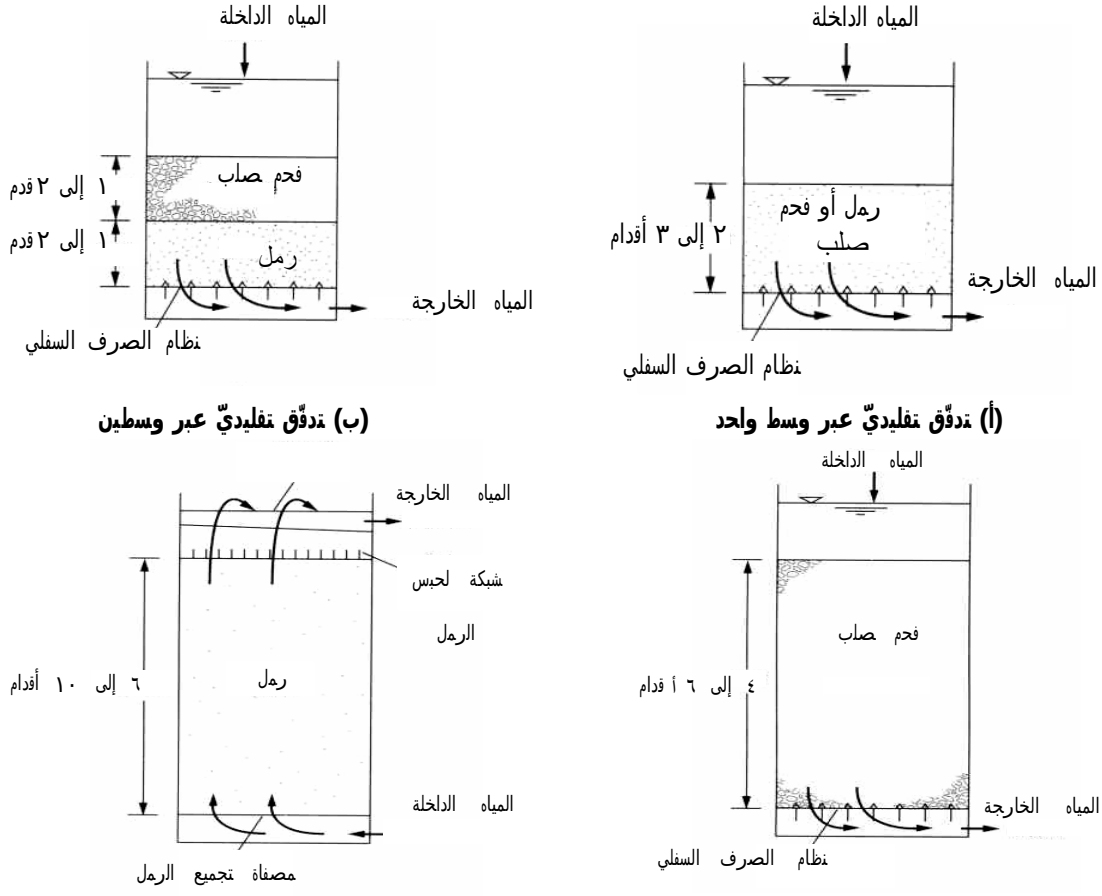
الطريقة	وصف الطريقة
التعويم بالتفريغ	تتضمّن هذه الطريقة تشبيع المياه العادمة بالهواء، إمّا مباشرة في خزّان التهوية بإدخال الهواء في جهة المصّ لمضخّة المياه العادمة. ويفرّغ الهواء جزئيّاً، ويطفو الهواء المذاب فقاقيع صغيرة تعلق بها الجوامد بحيث تشكل غطاءً من الرغوة. وتزال الرغوة بالكشط وتنزع الحصى المترسّبة من مجمّع سفلي.
المضافات الكيميائية	تساعد المواد الكيميائية في عملية التعويم بإنتاج سطح قابل لامتزاز أو حبس فقاقيع الهواء، ويمكن استخدام المواد الكيميائية غير العضوية والبوليمرات العضوية المختلفة لهذا الغرض.

المصدر: مقتبس من: Metcalf and Eddy, Inc., *Wastewater engineering*. 3rd ed.، مرجع سبق ذكره.

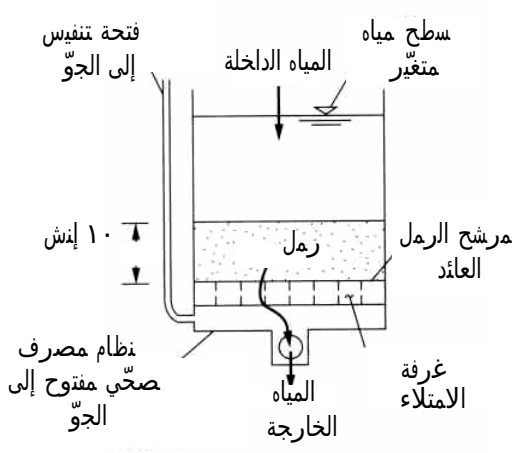
(و) الترشيح عبر وسط حبيبي

أصبح ترشيح المياه المعالجة مؤخراً أكثر شيوعاً. وهذه العملية تستخدم أنواع المراشح المبيّنة في الشكل ٣ وتستهدف إزالة إضافية للأجسام الصلبة العالقة في المياه المعالجة بيولوجياً أو كيميائياً، ونزع الفوسفور المترسّب كيميائياً.

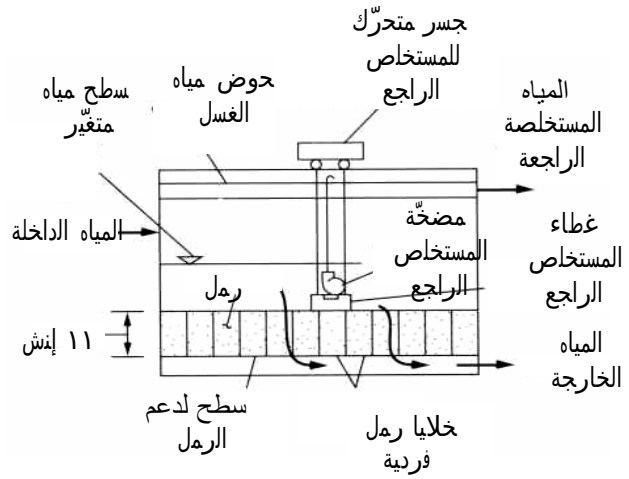
الشكل ٤- أنواع المراشح المستخدمة لترشيح المياه العادمة المعالجة



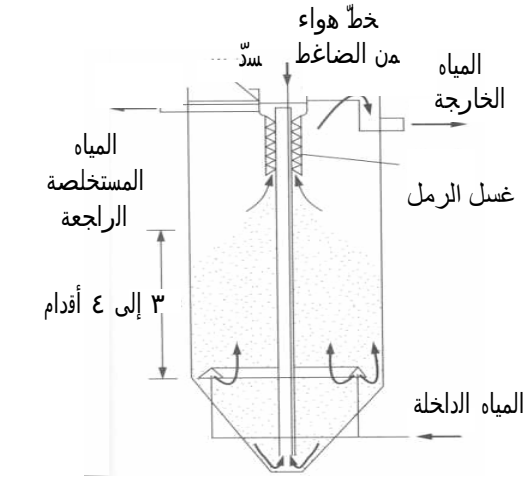
الشكل ٤ (تابع)



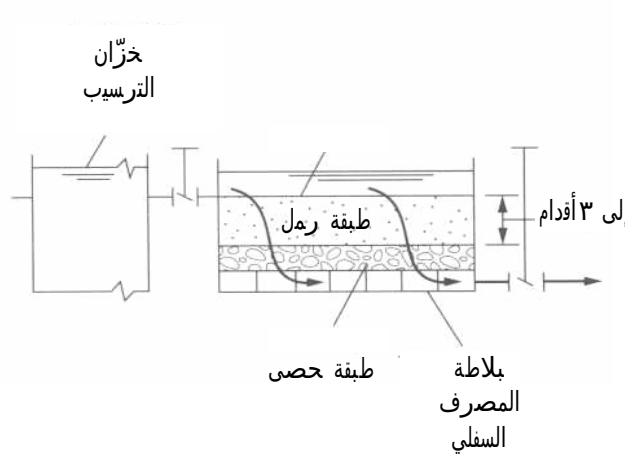
(ه) مرشّح ذو طبقة نبضيّة



(و) مرشّح ذو جسر متحرّك



(ز) مرشّح ذو تدفّق إلى الأعلى عميق الطبقة مع إرجاع المستخلص بشكل مستمرّ



(ح) مرشّح رملي بطيء

المصدر: مقتبس من: Metcalf and Eddy, Inc., *Wastewater engineering*, 3rd ed.، مرجع سبق ذكره.

وتتألّف عملية الترشيح من مرحلتين هما الترشيح والتنظيف. وخلال هذه العملية، تمرّ المياه العادمة عبر طبقة مؤلّفة من مادة حبيبيّة كالرمل (الجدول ٥)، حيث تحدث واحدة أو أكثر من آليّات الإزالة التالية: التصفية أو الاعتراض أو الرصّ أو الترسيب أو التلبّد أو الامتزاز. وتختلف مرحلة التنظيف حسب طريقة عمل المرشح، ففي الترشيح النصف مستمر، تتعاقب عمليات الترشيح والتنظيف، وفي الترشيح المستمرّ تجري العمليتان في آن واحد(١٢).

(١٢) المرجع نفسه.

الجدول ٥- الخصائص الفيزيائية والتشغيلية لمراشح الوسط الحبيبي المستخدمة عادةً

نوع المرشح	نوع طبقة المرشح	وسط الترشيح	عمق الطبقة النموذجي (إنش)	العملية خلال مرحلة الترشيح	العملية خلال عملية التنظيف
نصف مستمرّ اعتيادي؛ جريان إلى الأسفل	وسط واحد وسطين متعدّد الوسائط	رمل أو فحم صاب رمل أو فحم صاب رمل أو فحم صاب أو عقيق	٣٠ ٣٦ ٣٦	يمرّ السائل نحو الأسفل عبر طبقة المرشح. ويمكن أن يكون معدّل الدفق عبر المرشح ثابتاً أو متغيّراً حسب طريقة التحكم بالدفق.	عندما يزداد تعكر المياه الخارجة، أو عندما يصل فقدان العلو إلى المستوى المسموح به، يغسل المرشح بعكس اتجاه الدفق عبر المرشح. ويستخدم الهواء والماء خلال هذه العملية.
طبقة عميقة، نصف مستمرّ، جريان إلى الأسفل	وسط واحد	رمل أو فحم صاب	-	يمرّ السائل نحو الأسفل عبر طبقة المرشح. ويمكن أن يكون معدّل الدفق عبر المرشح ثابتاً أو متغيّراً حسب طريقة التحكم بالدفق.	عندما يزداد تعكر المياه الخارجة، أو عندما يصل فقدان العلو إلى المستوى المسموح به، يغسل المرشح بعكس اتجاه الدفق عبر المرشح. ويستخدم الهواء والماء خلال هذه العملية.
طبقة عميقة، نصف مستمرّ، جريان إلى الأعلى	وسط واحد	رمل أو فحم صاب	٤٨-٧٢	يمرّ السائل نحو الأعلى عبر طبقة المرشح. ويكون معدّل الدفق عبر المرشح ثابتاً إجمالاً.	عندما يزداد تعكر المياه الخارجة، أو عندما يصل فقدان العلو إلى المستوى المسموح به، يغسل المرشح بزيادة معدّل الدفق عبر قاع المرشح. ويستخدم الهواء والماء خلال هذه العملية.
طبقة نبضيّة، نصف مستمرّ، جريان إلى الأسفل	وسط واحد	رمل	٤٨-٧٢	يمرّ السائل نحو الأسفل عبر طبقة المرشح. وعندما يتراكم فقدان العلو، يخرج الهواء إلى الأعلى عبر الطبقة حتى السطح ثمّ يعيد توزيع الجوامد. ويكون معدّل الدفق عبر المرشح ثابتا إجمالاً.	عندما يزداد تعكر المياه الخارجة، أو عندما يصل فقدان العلو إلى المستوى المسموح به، يغسل المرشح بعكس اتجاه الدفق عبر المرشح. ويستمرّ السائل بدخول المرشح خلال هذه العملية. ويستخدم التنظيف الكيميائي أيضاً.
طبقة عميقة، مستمرّ، جريان إلى الأعلى	وسط واحد	رمل	٤٨-٧٢	يمرّ السائل نحو الأعلى عبر طبقة المرشح، التي يكون وسطها متحرّكاً نحو الأسفل باتجاه معاكس للتيار. ويكون معدّل الدفق عبر المرشح ثابتا إجمالاً.	ينظف وسط المرشح بطريقة مستمرّة بضخّ رمل من قاع المرشح عبر رافعة هوائية إلى مغسل للرمل موضوع في أعلى المرشح. وبعد مروره بالمغسل، يوزّع الرمل النظيف على سطح طبقة الترشيح.
جسر متحرّك مستمرّ، جريان إلى الأسفل	وسط واحد وسطين	رمل رمل	١١ ١٦	يمرّ السائل نحو الأعلى عبر طبقة المرشح. ويستمرّ السائل بالترشيح في حين يعود المستخلص إلى الخلايا المنفردة. ويكون معدّل الدفق عبر المرشح ثابتا إجمالاً.	عندما يصل فقدان العلو إلى المستوى المسموح به، تغسل الخلايا المنفردة للمرشح بعكس اتجاه الدفق عبر كل واحدة من الخلايا بالتتابع. وتنزع مياه المستخلص الراجع عبر غطاء المستخلص الراجع.

المصدر: Metcalf and Eddy, Inc، مرجع سبق ذكره.

٢- العمليّات الكيميائية

تعمل الوسائل الكيميائية المستخدمة لمعالجة المياه العادمة عن طريق التفاعلات الكيميائية، وتدمج عادة مع العمليّات الفيزيائية والبيولوجية. ومن أهم أضرار هذه العمليات، أنّها تراكمية، تساهم في زيادة المواد المذابة في المياه العادمة، وهذا قد يشكّل عاملاً هاماً لدى إعادة استخدام المياه العادمة. وتتضمن الفقرات التالية عرضاً لأهم العمليّات الكيميائية المستخدمة.

(أ) الترسيب الكيميائي

يساعد التخثير الكيميائي للمياه العادمة الخام قبل الترسيب في تلبّد الأجسام الصلبة المجزّأة لتشكل كتلا سهلة الترسيب. وبهذه الطريقة، تزيد فعالية إزالة المواد الصلبة المعلقة والفوسفور وغيرها بالمقارنة مع الترسيب العاديّ بدون تخثير. وتتأثر درجة التصفية الناتجة بكميّة المواد الكيميائية المضافة ودقة التحكم بالعملية[١٣].

ويعتمد اختيار المخثر تحقيقاً لترسيبٍ معزّزٍ على الأداء والكلفة. ومن المخثرات المستعملة عادة لمعالجة المياه العادمة الشبّ وكلوريد الحديديك وكبريت الحديديك والكبريت الحديدي والكلس[١٤].

وتزال المواد الصلبة المعلقة بالمعالجة الكيميائية عن طريق ثلاث عمليّات متتابعة هي: المزج السريع والتلبّد والترسيب. ففي مرحلة أولى، تضاف المادة الكيميائية وتمزج مزجاً سريعاً خلال ٢٠ إلى ٣٠ ثانية، ثمّ تلبّد الجسيمات عبر حثّ تدرّجات في السرعة بطريقة ميكانيكية، ويستلزم التلبّد ١٥ إلى ٣٠ دقيقة في حوضٍ مجهّز بعنفة[١٥]؛ وأخيراً تصفى المياه بتأثير الجاذبية. والتخثير، بالرغم من فعاليّته، ينتج كميّة أكبر من الحمأة الأوّلية التي يصعب تجفيفها، ويتسم بالصعوبة وارتفاع كلفة التشغيل. (انظر أيضاً الجدول ٣ في الصفحة ٧).

(ب) الامتزاز بالكربون المنشّط

الامتزاز هو عملية تجميع المواد الذائبة في محلول على سطح مناسب. وتعالج المياه العادمة عادة بالكربون المنشّط بعد المعالجة البيولوجية العادية بهدف إزالة قسم من المادة العضوية الذائبة المتبقّية أو الجسيمات. ويُصنع الكربون المنشّط بتسخين الفحم إلى حرارةٍ عالية ومن ثمّ تنشيطه عبر تعريضه لغاز مؤكسِد. ويؤدّي الغاز إلى إنتاج مسامٍ في الفحم بحيث يزيد من مساحة السطوح الداخلية. ويشيع استخدام نوعين من الكربون المنشّط هما: الكربون المنشّط الحُبَيبي، وقطره أكبر من ٠,١ مم، ومسحوق الكربون المنشّط وقطره أقلّ من ٢٠٠ mesh[١٦].

وتسلط المياه على القسم الأعلى لعمود ذي طبقةٍ مثبّتةٍ من الكربون المنشّط الحُبَيبي، ثمّ تسترجع من الأسفل (الشكل ٥). وينبغي تنظيف سطح الكربون للحدّ من فقدان فعاليته بسبب تراكم المواد العضوية.

---

(١٣) المرجع نفسه.

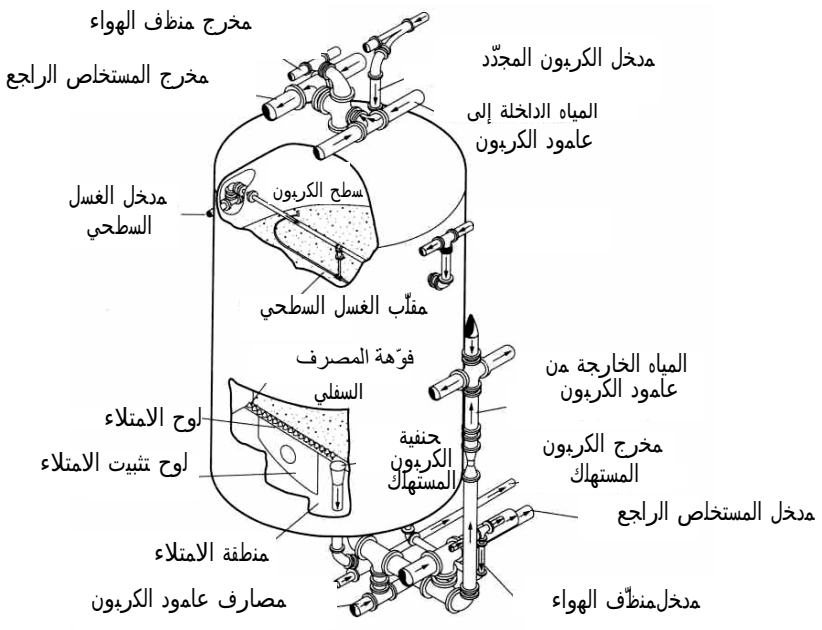
(١٤) Water Environment Federation and American Society of Civil Engineers، مرجع سبق ذكره.

(١٥) Liu and Liptak، مرج سبق ذكره.

(١٦) Metcalf and Eddy, Inc., *Wastewater engineering*. 3rd ed.، مرجع سبق ذكره.

ويمكن تجديد الكربون الحبيبي بأكسدته في محرقة، غير أن فعالية الكربون المجدّد أدنى قليلاً من فعالية الكربون البِكر[١٧].

الشكل ٥- نموذج لملامس الكربون المنشّط الحُبَيبي



المصدر: مقتبس من: Metcalf and Eddy, Inc., *Wastewater engineering,* 3rd ed.، مرجع سبق ذكره.

ولمعالجة المياه العادمة باستخدام مسحوق الكربون المنشّط، يضاف المسحوق مباشرة إلى المياه في خزّان التلامس لبعض الوقت، حيث يترسّب المسحوق في القاع ويُزال. ويمكن إزالة مسحوق الكربون بسهولة أكبر بالترشيح عبر وسائط حُبَيبية. ومن مشاكل استخدام مسحوق الكربون المنشّط أنّ طرائق تجديده ليست معرّفة جيداً.

(ج) التطهير

يعرّف التطهير بأنه الإتلاف الانتقائيّ للمتعضّيات الصُغريّة الممرضة، ويُعتبر عملية هامة في معالجة المياه العادمة بسبب نوعية هذه المياه واحتوائها على أنواع مختلفة من المتعضّيات المعويّة البشريّة المسبّبة لعدد من الأمراض المنقولة بالمياه. ويجري التطهير عادة باستخدام إحدى الطرائق التالية: العوامل الفيزيائية ومنها الحرارة والضوء؛ والعوامل الميكانيكية ومنها التصفية والترسيب والترشيح وغيرها؛ والإشعاع باستخدام أشعة غاما؛ والعوامل الكيميائية ومنها الكلور ومركّباته والبروم واليود والأوزون والفينول والمركبات الفينولية والكحول والمعادن الثقيلة والأصباغ والصابون والمنظفات الاصطناعية وغيرها. أمّا المواد الأكثر استعمالاً فهي الكلور والمواد الكيميائية المؤكسدة.

(١٧) Qasim, S.R., Wastewater treatment plants: planning, design and operation. c2 ed. Lancaster, Pensylvania Technomic Publishing Company,1999.

وتعمل المطهّرات بواحدة أو أكثر من الآليّات التالية: إتلاف حائط الخلايا، أو تغيير نفاذيّة الخلايا، أو تغيير الطبيعة الغروانية للجبلة، أو منع نشاط الأنزيمات. وعند استخدام المطهّرات، ينبغي النظر في العوامل التالية: وقت التماس، وتركيز ونوع العامل الكيميائي، وقوة ونوع العامل الفيزيائي، والحرارة وعدد المتعضّيات وطبيعة السائل[١٨].

(د) نزع الكلور

ينبغي نزع رواسب الكلور من المياه العادمة المعالَجة بالكلور قبل إعادة استخدامها أو صرفها في المياه المستقبِلة. وتتفاعل مركبات الكلور مع عدد كبير من المركبات العضوية في المياه العادمة، منتجةً مركباتٍ سامة غير مرغوب فيها، ومحدثةً آثاراً سلبية طويلة الأجل على البيئة المائية والمتعضّيات الصغرية فيها. ويمكن نزع الكلور باستخدام الكربون المنشّط أو بإضافة عامل اختزال، كثاني أكسيد الكبريت وكبريتات الصوديوم، غير أنّ نزع الكلور لا يزيل المخلفات الثانويّة السامة التي تكون قد أنتجت سابقاً[١٩].

٣- العمليّات البيولوجية

تستخدم العمليّات البيولوجية لتحويل المواد العضويّة المفتتة والذائبة في المياه العادمة إلى أجسام صلبة عضوية وغير عضوية ملبّدة وقابلة للترسّب. وخلال هذه العمليّات، تقوم المتعضّيات الصغريّة، وخاصةً البكتيريا، بتحويل المواد العضوية الغروانية والكربونية إلى غازاتٍ مختلفة وأنسجة خلايا يمكن نزعها في خزّانات الترسيب. وتستعمل العمليّات البيولوجية عادة بالاقتران مع العمليّات الفيزيائية والكيميائية بهدف خفض محتوى المياه العادمة من المواد العضوية والمغذيات كالنتروجين والفوسفور. وتقسّم العمليّات البيولوجية إلى الأنواع التالية: عمليّات هوائية ولا هوائية، وعمليّات بنقص الأكسجين، وعمليّات مزدوجة، وعمليّات الِبرك. ويمكن تقسيم العمليّات البيولوجية أيضاً إلى فئتين، فئة تكون المتعضّيات الصغريّة فيها معلقةً في السائل، وفئة أخرى تكون المتعضّيات الصغريّة فيها مثبّتةً على سطح ما، وقد تستخدم بعض الأنظمة المزدوجة هاتين الطريقتين معاً. وتستعرض الفقرات التالية العمليّات البيولوجية الأكثر استخداماً.

(أ) عملية الحمأة المنشّطة

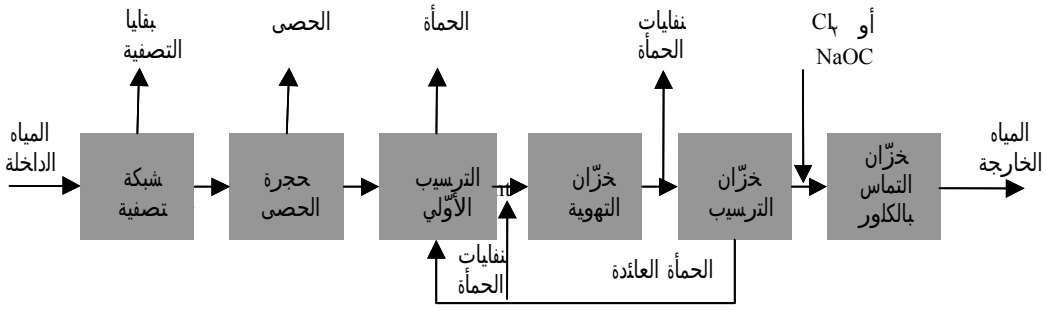
تتكوّن عمليّة الحمأة المنشّطة من نظام لا هوائي مستمرّ الدفق (الشكل ٦) يستخدم كتلة من المتعضّيات الصغريّة المنشّطة والقادرة على تثبيت المواد العضوية. وخلال العمليّة، تصل المياه العادمة المصفّاة عبر الترسيب الأوّلي إلى حوضٍ للتهوية حيث تمزج بكتلة منشّطة من المتعضّيات الصغريّة. وتقوم هذه المتعضّيات، المؤلفة عادة من بكتيريا وكائنات وحيدة الخلية، بتحليل المواد العضوية لا هوائياً إلى ثاني أكسيد الكربون ومياه وخلايا جديدة ومنتجات أخرى. وتنتمي مجموعة البكتيريا المُستعملة في أنظمة الحمأة المنشّطة إلى أنواع سلبيّة. وللحفاظ على بيئةٍ هوائيةٍ للحوض، تُستخدم التهوية المنتشرة أو الميكانيكية، مما يساعد أيضاً على إبقاء محتويات المُفاعل ممزوجة. وبعد مضي زمن الاستبقاء، يمر السائل الممزوج إلى حوض ثانوي للترسيب حيث تترسّب الحمأة ثمّ تصرف المياه المصفاة. ويُعاد استخدام جزء من الحمأة المترسّبة في حوض التهوية للمحافظة على التركيز اللازم للحمأة المنشّطة.

---

(١٨) Qasim، مرجع سبق ذكره.

(١٩) Qasim ، مرجع سبق ذكره.

الشكل ٦- نموذج التدفق خلال عملية الحمأة المنشطة



من الأهمية التحكم بعمليّة الحمأة المنشّطة للحفاظ على مستوى عالٍ للأداء في ظروف تشغيلية متعدّدة. وأهمّ عوامل الضبط: الحفاظ على مستويات الأكسجين المذاب في خزّانات التهوية؛ وتنظيم كمّية الحمأة المنشّطة العائدة؛ والتحكّم بنفايات الحمأة المنشّطة. ويتضمن الجدول ٦ وصفاً لعمليات الحمأة المنشطة وتعديلات العمليات.

الجدول ٦- وصف عمليات الحمأة المنشطة وتعديلات العمليات

العملية أو تعديل العملية	الوصف	فعالية نزع الحاجة الكيميائية البيولوجية (النسبة المئوية)
الدفق الصمّي التقليدي	تدخل المياه العادمة المترسّبة والحمأة المنشّطة المعاد تدويرها إلى رأس خزّان التهوية حيث تمتزج بالهواء المنتشر أو التهوية الميكانيكية. ويوزّع الهواء بانتظام على طول الخزّان. خلال مرحلة التهوية، يجري امتزاز وتليبد وأكسدة المواد العضوية. وتفصل جوامد الحمأة المنشطة في خزّان الترسيب الثانوي.	٨٥-٩٥
المزج التام	تطبيق لنظام التدفّق لمفاعل ذي خزّان تقليب وتدفّق مستمرّ. وتدخل المياه العادمة المترسّبة والحمأة المعاد تدويرها من عدة نقاط في خزّان التهوية. وتتوزّع الحمولة العضوية والطلب على الأكسجين بانتظام على طول الخزّان.	٨٥-٩٥
التهوية المتناقصة تدريجياً	التهوية المتناقصة تدريجياً هي تعديل لعملية الجريان الصمّي التقليدية. وتسلط معدّلات تهوية مختلفة على طول الخزان حسب الحاجة إلى الأكسجين. ويزوّد رأس الخزّان بكميّات أكبر من الهواء وتتناقص الكمية كلما اقترب السائل الممتزج من المخرج. وتجري التهوية المتناقصة باستخدام تباعد مختلف لناشرات الهواء على طول الخزّان.	-
التهوية المتدرّجة	التهوية المتدرّجة هي تعديل لعملية الجريان الصمّي التقليدية. وتدخل المياه العادمة المترسّبة من عدّة نقاط إلى خزّان التهوية لمعادلة نسبة الغذاء للمتعضيات الصغرية، بحيث تنخفض ذروة الحاجة إلى الأكسجين. وتستخدم عادة ثلاث قنوات متوازية أو أكثر. ومرونة التشغيل هي من أهمّ خصائص هذه العملية.	٨٥-٩٥
التهوية المعدّلة	تشابه التهوية المعدّلة عملية الجريان الصمّي التقليدية باستثناء أنّ زمن التهوية أقصر ونسبة الغذاء للمتعضيات الصغرية أعلى. وتنخفض فعالية نزع الطلب البيولوجي الكيميائي على الأكسجين لهذه العملية بالمقارنة مع عمليات الحمأة المنشّطة الأخرى.	٦٠-٧٥

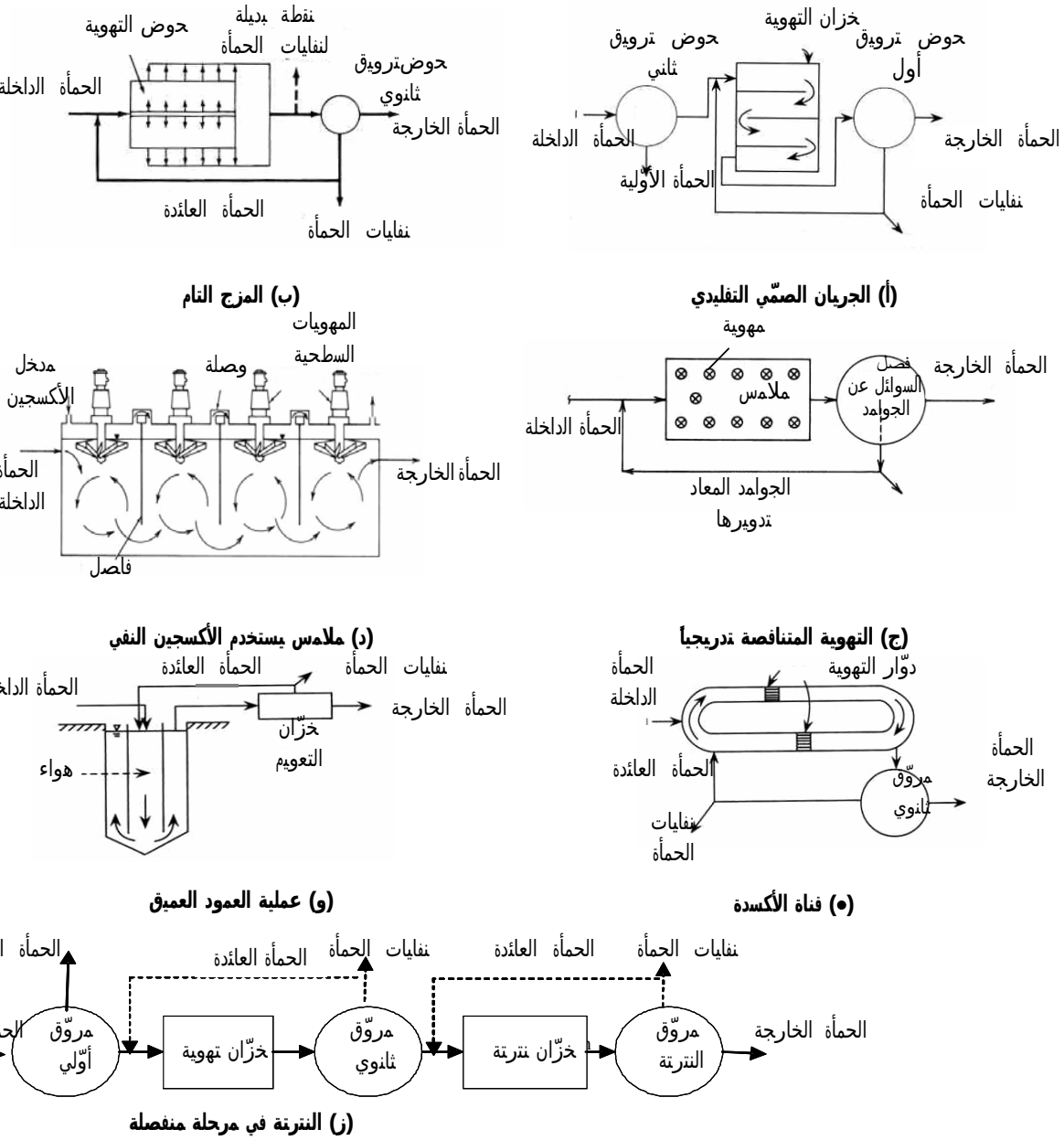
الجدول ٦ (تابع)

العملية أو تعديل العملية	الوصف	فعالية نزع الحاجة الكيميائية البيولوجية (النسبة المئوية)
التثبيت التلامسي	تستخدم عملية التثبيت التلامسي خزّانين منفصلين لمعالجة المياه العادمة وتثبيت الحمأة المنشّطة. وتمتزج الحمأة المنشّطة مع المياه العادمة الداخلة (خام أو مترسّبة) في خزّان التلامس. ويترسّب مزيج السائل في خزّان الترسيب الثانوي وتهوّى الحمأة العائدة بطريقة منفصلة في حوض إعادة التهوية من أجل تثبيت المواد العضوية. وتتطلب هذه العملية نصف حجم التهوية الذي تحتاج إليه عملية الجريان الصمّي التقليدية.	٩٠-٨٠
التهوية الممدّدة	تشابه عملية التهوية الممدّدة عملية الجريان الصمّي التقليدية باستثناء أنّها تعمل في مرحلة التنفّس الداخليّ المنشأ لمنحنى النموّ، ممّا يتطلب حمولة عضوية منخفضة وزمن تهوية أطول. تستخدم العملية كثيراً للمحطات السابقة التصنيع التي تخدم مجتمعات صغيرة.	٩٥-٨٥
التهوية بمعدّل مرتفع	التهوية بمعدّل مرتفع هي عملية معدّلة ترتفع فيها كثافة الجوامد المعلقة في السائل الممتزج وترافق ذلك حمولات حجمية مرتفعة. ويؤمّن هذا الائتلاف نسبة مرتفعة من الغذاء مقابل المتعضيات الصغرية وأزمنة منخفضة لمعدّل بقاء الخلايا مع أزمنة استبقاء هيدروليكية قصيرة نسبياً. ويتخذ المزج الملائم أهمية بالغة في هذه العملية.	٩٠-٧٥
عملية كراوس (Kraus)	عملية كراوس هي تعديل لعملية التهوية المتدرّجة وتستخدم لمعالجة المياه العادمة التي تحتوي على مستويات منخفضة من النتروجين. ويضاف طفو الهاضم باعتباره مصدر غذاء لقسم من الحمأة العائدة في خزّان تهوية منفصل ومصمّم للنترتة. ويضاف السائل الممتزج الناتج إلى عملية التهوية الأساسية ذات الجريان الصمّي.	٩٥-٨٥
أكسجين عالي النقاوة	يستخدم الأكسجين العالي النقاوة بدلاً من الهواء خلال عملية الحمأة المنشطة. ينشر الأكسجين في خزّانات تهوية مغطاة ويعاد تمريره. يستهلك قسم من الغاز لخفض تركيز ثاني أكسيد الكربون. قد تحتاج العملية إلى تعديل للأس الهيدروجيني. كمية الأكسجين المضافة أكثر بأربع مرّات تقريباً من أنظمة التهوية التقليدية.	٩٥-٨٥
قناة الأكسدة	تتضمّن قناة الأكسدة قناة ذات شكل مستدير أو بيضاويّ معدّة بأجهزة تهوية ميكانيكية. وتدخل المياه العادمة المصفاة إلى القناة حيث تهوّى ثمّ تمرّ بسرعة ٠,٨ إلى ١,٢ قدم في الثانية. وتعمل قناة الأكسدة عادة في نسق التهوية الممتدّة مع أزمنة طويلة للاستبقاء واحتجاز الجوامد. وتستخدم خزّانات ترسيب ثانوية لمعظم التطبيقات.	٩٥-٧٥
مفاعل الدفعات التتابعي	مفاعل الدفعات التتابعي هو مفاعل من نوع التعبئة والسحب، ويتضمّن مفاعلاً واحداً للمزج التام تجري فيه جميع مراحل عملية الحمأة المنشطة. ويبقى السائل الممتزج في المفاعل خلال جميع الدورات، بحيث لا تعود هناك حاجة إلى خزّان ترسيب ثانوي منفصل.	٩٥-٨٥
مفاعل العمود العميق	مفاعل العمود العميق هو نوع من عمليّات الحمأة المنشطة يستعاض فيه عن أحواض الترويق والتهوية الأولية بعمود ذي عمق ٤٠٠ إلى ٥٠٠ قدم. ويبطّن العمود بقشرة فولاذية، ويركّب على أنبوب متحد المركز للحصول على مفاعل حلقيّ. ويدفع السائل الممتزج والهواء إلى أسفل العمود ثمّ يترك ليرتفع عبر الحلقة.	٩٥-٨٥
النترتة بمرحلة واحدة	خلال عملية النترتة بمرحلة واحدة، يجري خفض الطلب البيولوجي الكيميائي والأمونيا معاً في مرحلة بيولوجية واحدة. ويمكن أن تكون تشكيلة المفاعل إمّا سلسلة من مفاعلات المزج التام أو جرياناً صمّياً.	٩٥-٨٥
النترتة بمراحل منفصلة	خلال عملية النترتة بمراحل منفصلة، يستخدم مفاعل منفصل للنترتة ويعمل بتغذية نفايات من وحدة المعالجة البيولوجية السابقة. ومن حسنات هذا النظام إمكان تمثيل العمليات لتوافق متطلبات النترتة.	٩٥-٨٥

المصدر: Metcalf and Eddy Inc., *Wastewater engineering*, 3rd ed.، مرجع سبق ذكره.

والمشكلة الأساسية عند تشغيل نظام كهذا هي التنفخ الحجمي للحمأة، ومن أسبابه انعـدام الفوسـفور والنتروجين والعناصر النزرة، أو الاختلافات في الأس الهيدروجيني والحرارة والأكسجين المذاب. وتخـفَ قدرة الحمأة المنتفخة الحجم على الترسّب والتراصّ بسبب النمو الزائد للمتعضّيات الصغريّة الخيطيّة. ويمكن التحكم بهذه المشكلة عن طريق كلورة الحمأة المعادة[٢٠]. ويتضمن الشـكل ٧ عمليـات مختـارة للحمـأة المنشطة.

الشكل ٧- عمليات مختارة للحمأة المنشطة



المصدر: مقتبس من Liu and. Liptak، مرجع سبق ذكره.

(٢٠) Liu and. Liptak، مرجع سبق ذكره.

(ب) البحيرات المهويّة

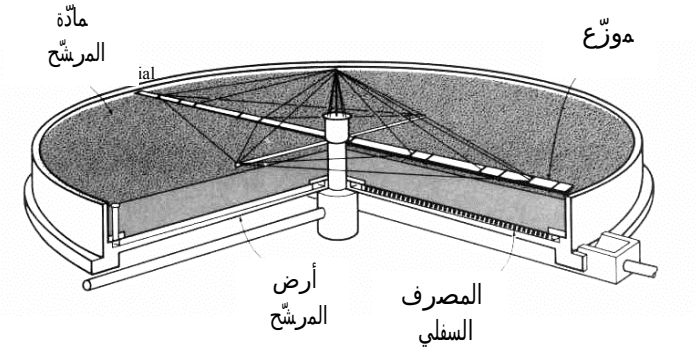
يتراوح عمق البحيرات المهواة بين متر وأربعة أمتار. ويشابه مبدأ المعالجة فيها عملية الحمأة المنشّطة مع فروقٍ ناجمة عن المساحة الكبيرة لسطح البحيرات، والتي تسبّب آثاراً حراريةً كبيرة. وتهوّى المياه العادمة بالتهوية السطحية أو المنتشرة أو باستخدام عنفة. ويساعد الاضطراب الناتج من التهوية على إبقاء محتويات البحيرة معلقةً. وحسب زمن الاستبقاء، تحتوي المياه الخارجة من البحيرات المهواة على ثلث إلى نصف القيمة الداخلة للطلب البيولوجي على الأكسجين تقريباً، على شكل كتلٍ خلوية. ويمكن نزع معظم هذه المواد الصلبة في خزّان ترسيب قبل الصرف النهائي للمياه.

(ج) المراشح النضّاضة

المرشّح النضّاض من أكثر عمليّات المعالجة البيولوجية الهوائية استخداماً لإزالة المواد العضوية من المياه العادمة. ويتكوّن هذا النوع من الأنظمة من طبقةٍ منفذةٍ تثبّت المتعضّيات الصغريّة على سطحها، بحيث تشكل طبقةً من الطين البيولوجي، تترشّح المياه عبرها. ويتكوّن المرشّح عادةً من حجر أو مادة حشو بلاستيكية. وتتحلل المواد العضويّة الموجودة في المياه العادمة عبر امتزازها على طبقة الطين البيولوجي. وفي القسم الخارجي لطبقة الطين هذه، تتحلل المواد العضوية عن طريق المتعضّيات الصغريّة الهوائية. وعندما تنمو المتعضّيات الصغريّة، تزيد سماكة طبقة الطين ويستنفد الأكسجين قبل أن يدخل إلى عمق الطبقة، بحيث تتكوّن بيئة لا هوائية قرب سطح المرشّح. وكلما ازدادت سماكة طبقة الطين، تبدأ المواد العضوية بالتحلل قبل الوصول إلى المتعضّيات الصغريّة الموجودة على سطح المرشّح، فتموت هذه المتعضّيات وتنجرف مع المياه المتدفّقة، ثمّ تنمو طبقة جديدة من الطين مكان الطبقة السابقة، وهذا يُعرف بالسلخ[٢١].

تجمع المياه المعالجة في مصرفٍ سفليّ بعد مرورها عبر المرشّح بالإضافة إلى المواد الصلبة البيولوجية التي انسلخت عن الوسط (الشكل ٨). وتمرّ المياه المجمّعة إلى خزّان ترسيب حيث تنزع المواد الصلبة، ثمّ يُعاد استخدام جزء من المياه المعالجة لتخفيف تركيز المياه العادمة الداخلة والحفاظ على طبقة طين بيولوجية رطبة.

الشكل ٨- مقطع عرضي لمرشّح نضّاض



المصدر: مقتبس من: Metcalf and Eddy, Inc., *Wastewater engineering*, 3rd ed.، مرجع سبق ذكره.

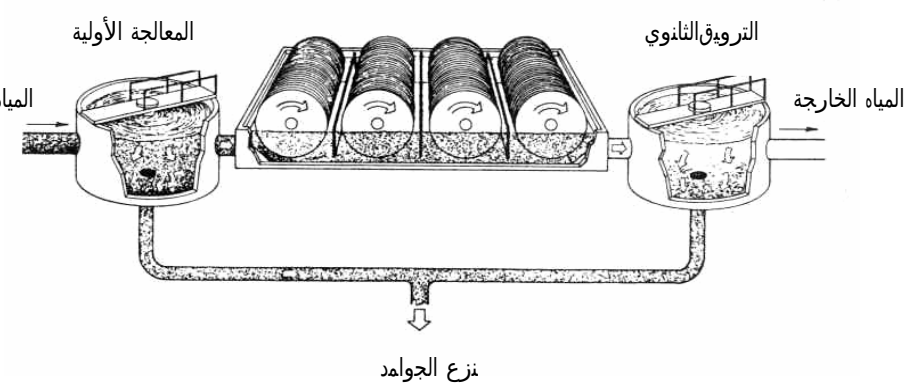
(٢١) Liu and. Liptak، مرجع سبق ذكره.

(د) الملامِسات البيولوجية الدوّارة

تكوّن الملامِسات البيولوجية الدوّارة نظماً بيولوجية ذات متعضّيات صغريّة مثبّتة (الشكل ٩)، وتتألّف من حوض أو أكثر تدور فيه ببطء أقراصٌ دائريّة متقاربة ومركبة على أعمدة أفقيّة. وتغمر الأقراص المصنوعة من البولستيرين أو الكلوريد المتعدّد الفاينل جزئيّاً في المياه العادمة بحيث تتشكل طبقة من الوحل البكتيريّ على سطحها الرطب. ويسمح دوران هذه الأقراص بتعرّض البكتيريا للمياه العادمة حيث تمتزّ المواد العضوية، ثمّ للهواء حيث تمتصّ الأكسجين. ويساعد الدوران أيضاً على إزالة البكتيريا الزائدة من سطح الأقراص والحفاظ على أجسام بيولوجية صلبة مسلوخة ومعلقة. ويلي ذلك خزّان ترسيب نهائي لنزع الأجسام الصلبة المسلوخة. وتتحلل المواد العضوية بنفس طريقة المرشّحات النضّاضة. وتستخدم الملامِسات البيولوجية الدوّارة المغمورة جزئياً لنزع الطلب البيولوجي على الأكسجين الكربوني، والأكسدة الكربونية والنترتة المؤتلفة، بالإضافة إلى نترتة مياه الصرف الثانوية، بينما تستخدم الملامِسات البيولوجية الدوّارة المغمورة كلياً لإزالة النترات[٢٢].

وتقسّم الملامِسات البيولوجية الدوّارة إلى مراحل مستقلّة أو خانات عبر حواجز في حوض واحد أو أحواض منفصلة مرتبة في مراحل. وينتج هذا التقسيم في خانات جريان صمّي، ممّا يزيد فعالية النظام ويتيح ظروفاً متنوّعة مناسبة للمتعضّيات بدرجات متفاوتة. وهكذا، عندما تتدفق المياه العادمة عبر الخانات، تحتوي المياه الداخلة إلى المرحلة التالية كميّة من المواد العضوية أقلّ من المرحلة السابقة، ممّا يحسّن عملية نزع هذه المواد العضوية.

الشكل ٩- تشكيلة نظام الملامسات البيولوجية الدوّارة



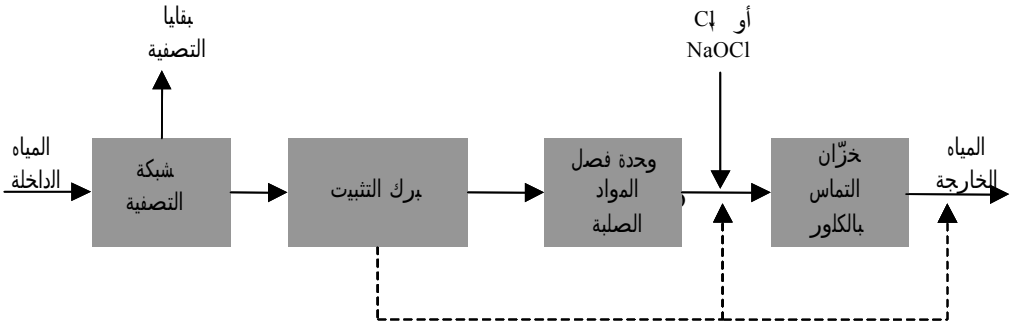
المصدر: Qasim، مرجع سبق ذكره.

(•) بِرك التثبيت

تتألّف بركة التثبيت من جسم مائيّ ضحل نسبياً في حوض ترابيّ، حيث تمزج المياه على نحو دائم، إمّا طبيعياً عبر الهواء أو الحرارة أو التخمير، أو مؤقتاً عبر تهوية ميكانيكية أو منتشرة. وتصنّف برك التثبيت حسب النشاط البيولوجي الذي يجري فيها، وقد يكون هوائياً، أو لا هوائياً أو اختياريّاً (الشكل ١٠).

(٢٢) المرجع نفسه.

الشكل ١٠- نموذج التدفق في بركة التثبيت



فبرك التثبيت الهوائية تستخدم لمعالجة النفايات العضويّة الذائبة والمياه الخارجة من محطات معالجة المياه العادمة؛ والبرك اللا هوائية تساعد في تثبيت فعّال وسريع للنفايات العضوية القوية؛ والبرك الاختيارية تستعمل لمعالجة المياه العادمة المنزلية وأنواع من النفايات الصناعية. وتعتبر البرك الهوائية والاختيارية معقدة من الناحية البيولوجية، وتقوم البكتيريا بأكسدة المواد العضوية، منتجة الأمونيا وثاني أكسيد الكربون والسلفات والمياه ونواتج أخرى، تستخدمها الطحالب في ضوء النهار لإنتاج الأكسجين، ثمّ تستخدم البكتيريا هذا الأكسجين بالإضافة إلى الأكسجين الموجود في الهواء لتحليل باقي المواد العضوية. ويتراوح زمن استبقاء المياه العادمة في برك التثبيت بين ٣٠ و١٢٠ يوماً. ويشيع استخدام برك التثبيت في المناطق الريفية بسبب انخفاض كلفة إنشائها وتشغيلها[٢٣].

الجدول ٧- أنواع وتطبيقات برك التثبيت

نوع البركة	الطريقة	المواصفات	التطبيق
هوائية	بركة ذات معدّل منخفض	مصمّمة للحفاظ على ظروف هوائية عبر عمق السائل.	معالجة النفايات العضوية المذابة ومياه الصرف الثانوية.
	بركة ذات معدّل مرتفع	مصمّمة لتمثيل إنتاج نسيج خلايا الطحالب وتحقيق مردود مرتفع من البروتينات القابلة للجمع.	نزع المغذيات ومعالجة النفايات العضوية المذابة وتحويل النفايات.
	بركة إنضاج	تشبه البركة ذات المعدل المنخفض لكن بحمولة أقل.	تحسين المياه الخارجة من عمليّات المعالجة التقليدية كالمرشح النضّاض والحمأة المنشّطة.
هوائية – لا هوائية (تهوية إضافية)	بركة اختيارية مهوية	ذات معدّل مرتفع لكونها أعمق من البرك الآنفة الذكر، وتنتج عمليات التهوية والتمثيل الضوئي الأكسجين اللازم للتثبيت الهوائي في الطبقات العليا، بينما تكون الطبقات السفلية اختيارية. أمّا الجوامد الموجودة في القاع، فتهضم لا هوائياً.	معالجة المياه العادمة المصفاة أو الخاضعة لترسيب أوّلي أو النفايات الصناعية.
هوائية – لا هوائية (أكسجين من الطحالب)	بركة اختيارية	تشبه البركة الاختيارية المهوّاة لكن دون تهوية إضافية. وتنتج عمليات التهوية السطحية والتمثيل الضوئي الأكسجين في الطبقات العليا فقط.	معالجة المياه العادمة المصفّاة أو الخاضعة لترسيب أوّليّ أو النفايات الصناعية.

(٢٣) Liu and. Liptak، مرجع سبق ذكره.

الجدول ٧ (تابع)

نوع البركة	الطريقة	المواصفات	التطبيق
لا هوائية	بحيرة لا هوائية، بركة للمعالجة الابتدائية اللا هوائية	تسيطر الظروف اللا هوائيـة علـى عملهـا، وتتبعها برك هوائية أو اختيارية.	معالجة المياه العادمة البلديـة أو النفايات الصناعية.
لا هوائية يتبعها عملية هوائية – لا هوائية	نظام برك	مزيج من البرك المذكورة آنفاً. وقد تتبع البـرك الهوائية -اللا هوائية بركة هوائية. تسـترجع المياه عامةً من البرك الهوائيـة إلـى البـرك اللا هوائية.	معالجة تامة للمياه العادمة البلدية والنفايات الصناعية وتحقيق نزع كبير للبكتيريا.

المصدر: مقتبس من: Metcalf and Eddy, Inc., Wastewater engineering. 3rd ed.، مرجع سبق ذكره.

(و) الهضم اللا هوائي التام الامتزاج

يتضمّن الهضم اللا هوائي التحويل البيولوجي للمواد العضوية وغير العضوية في غياب الأكسـجين الجزيئي إلى مجموعة متنوّعة من النواتج، منها الميثان وثاني أكسـيد الكربـون. وتعمـل مجموعـة مـن المتعضّيات اللا هوائية معاً لتحليل الحمأة والنفايـات العضـوية بـثلاث خطـوات هـي: التحلـل بالميـاه للمركبات ذات الكتلة الجزيئيّة المرتفعة؛ والتكوين بالحامض؛ ثمّ التكوين بالميثان.

وتجري العمليّة في مفاعل سَدود للهواء. وتدخل الحمأة باستمرار أو تقطع ثمّ تستبقى فـي المفاعـل لفترات مختلفة من الزمن. وبعد سحبها من المفاعل، تحتوي الحمأة المثّبتة على كمّيـة أقـلّ مـن المـواد العضوية والعوامل الممرضة وتكون غير قابلـة للانحـلال. وهنـاك نوعـان شـائعان مـن الهاضـمات اللا هوائية، يعمل الأوّل بمعدّل عادي بينما يعمل الثاني بمعدل مرتفع. وفي عملية الهضم بمعـدلٍ عـاديّ، لا تسخّن محتويات الهاضم ولا تُمزج، وتتراوح فترة استبقائها بين ٣٠ و٦٠ يوماً؛ وفي عملية الهضم بمعدّل مرتفع، تسخّن محتويات الهاضم وتمزج تماماً، وتستبقى لفترةٍ أقلّ من ١٥ يومـاً. ويُسـمّى مـزيج هـاتين العمليّتين بالعمليّة ذات المرحلتين، وتستخدم لفصل المواد الصلبة المهضومة من السائل الطافي(٢٤).

وتستخدم الهاضمات اللا هوائية عادة لمعالجة الحمأة والميـاه العادمـة ذات المحتويـات العضـوية المرتفعة. ولهذه العملية حسنات وأضرار ناجمة عن معدّل النمو البطيء للبكتيريا الميثانيـة الـذي يسـتلزم استبقاء الحمأة في الهاضم مدّة أطول نسبياً بغية الحصول على تثبيت جيد للنفايات. ومع ذلك يـؤدّي النمـو البطيء إلى تحويل قسم صغير فقط من المواد العضوية القابلة للتحلل إلى خلايا جديدة. ومن حسـنات هـذا النظام أيضاً إنتاج غاز الميثان، الذي يمكن استخدامه وقوداً. وينتج هذا النظام حمأة مثّبتة جيداً يمكن ردمهـا في الأرض بعد تجفيفها، غير أنه يتطلب درجات حرارة مرتفعة لتحقيق معالجة فعّالة.

(ز) نزع المغذيات البيولوجية

من أهمّ المغذيات التي ينبغي نزعها من المياه العادمة النتروجين والفوسفور، بسبب قـدرتهما علـى تعجيل أُجون البحيرات والخزانات ونمو الطحالب في مجاري المياه الضحلة. فالنتروجين المركز يستطيع أن

(٢٤) Metcalf and Eddy, Inc., *Wastewater engineering*. 3rd ed.، مرجع سبق ذكره.

يستنزف الأكسجين المذاب في المياه المستقبلة، ويسمّم الحياة المائية، ويعرقل فعالية التطهير بالكلور، ويشكل خطراً على الصحة العامة، ويؤثر في صلاحية إعادة استخدام المياه. ويمكن إزالة النتروجين والفوسفور بوسائل فيزيائية وكيميائية وبيولوجية.

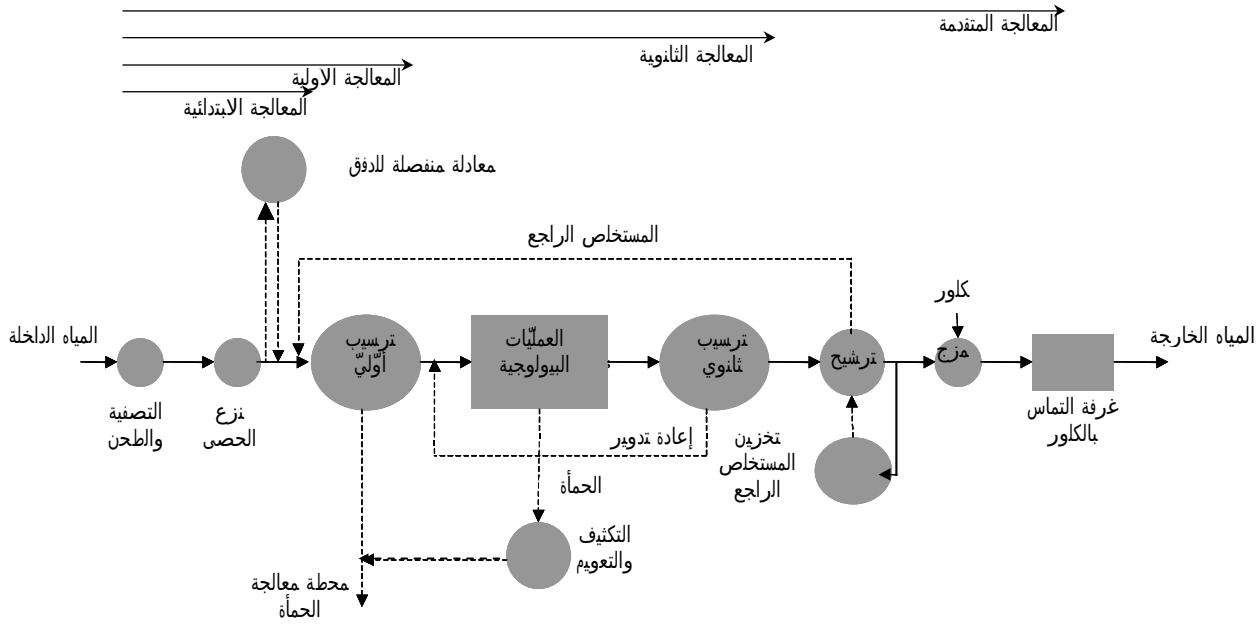
ويُنزع النتروجين بيولوجياً بعمليّتي النترتة ثمّ إزالة النترات. فعملية النترتة تؤدي إلى تحويل الأمونيا إلى نتريت ثمّ إلى نترات باستخدام نوعين من البكتيريا، ويمكن تحقيق هاتين العمليّتين داخل المفاعل ذاته المستخدم لنزع الطلب البيولوجي على الأكسجين أو داخل مفاعل منفصل؛ وعمليّة إزالة النترتة تحوّل النترات إلى غاز النتروجين في ظروف نقص الأكسجين.

ويزال نحو ١٠ إلى ٣٠ في المائة من الفوسفور الموجود في المياه العادمة خلال المعالجة البيولوجية الثانوية، وتنزع الكمية المتبقية بتعريض الميكروبات في الحمأة المنشطة تباعاً لظروف هوائية ثم لظروف لا هوائية، ممّا يؤدي إلى زيادة امتصاص المتعضّيات الصغرية للفوسفور.

باء- تطبيقات عمليّات المعالجة

ضمن محطات معالجة المياه العادمة، تجمع العمليّات المذكورة سابقاً في عدة تشكيلات لتحقيق مستويات متعدّدة من المعالجة. وتصنف هذه التشكيلات على النحو التالي: ابتدائية وأولية وثانوية ومتقدّمة (الشكل ١١).

الشكل ١١- مستويات معالجة المياه العادمة المختلفة في محطات المعالجة



١- المعالجة الابتدائية

تحضّر المعالجة الابتدائية المياه العادمة الداخلة بتخفيف أو نزع الخصائص التي يمكن أن تعوق عملية المعالجة أو تزيد كلفة صيانة المعدات في أسفل المجرى. ومن أهمّ تلك الخصائص وجود أجسام صلبة كبيرة وحصى، وروائح، وحمولة عضوية عالية جداً في بعض الأحيان. وتشمل المعالجة الابتدائية عادة العمليات الفيزيائية كالتصفية والطحن لإزالة الصخور والحطام، وعملية نزع الحصى، وعملية التعويم لنزع الشحوم، ومعادلة الدفق وطرائق مكافحة الروائح.

٢- المعالجة الأوّليّة

تشمل المعالجة الأولية نزع الأجسام الصلبة المعلقة والمواد العضوية جزئياً باستخدام العمليّات الفيزيائية كالتصفية والترسيب. ويمكن استعمال التهوية المسبقة والتلبّد الميكانيكي بالمضافات الكيميائية لتحسين المعالجة الأوّليّة التي تسبق المعالجة الثانوية. وتستهدف المعالجة الأولية إنتاج سائل مناسب للمعالجة البيولوجية وفصل الأجسام الصلبة بشكل حمأة يمكن معالجتها بطريقة سهلة واقتصاديّة قبل صرفها نهائياً. وتحتوي المياه الخارجة من المعالجة الأولية على كميّة كبيرة من المواد العضوية ومستوى مرتفع من الطلب البيولوجي على الأكسجين.

٣- المعالجة الثانوية

تستهدف المعالجة الثانوية إزالة المواد العضوية الذائبة الغروانية بالإضافة إلى الأجسام الصلبة المعلقة المتبقية من المعالجة الأولية. ويضمّ هذا النوع من المعالجة العمليّات البيولوجية كالمعالجة بالحمأة المنشّطة والمفاعلات ذات الغشاء الثابت، وأنظمة البحيرات والترسيب.

٤- المعالجة المتقدّمة

تحقق المعالجة المتقدمة مستوى أعلى من المعالجة عبر نزع كمّيات كبيرة من النتروجين والفوسفور والمعادن الثقيلة والمواد العضوية المنحلة حيوياً والبكتيريا والفيروسات. وإضافة إلى نزع المغذيات بيولوجياً، تضمّ المعالجة المتقدمة التخثر الكيميائي والتلبّد والترسيب، يتبعها الترشيح بالكربون المنشّط. ومن العمليّات المتقدّمة الأقلّ شيوعاً عمليّات التبادل الأيوني والتناضح العكسي لنزع أيونات محدّدة أو لتخفيف المواد الصلبة المذابة.

جيم- الأنظمة الطبيعية للمعالجة

تستفيد الأنظمة الطبيعية للمعالجة من العمليّات الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية التي تحدث في البيئة الطبيعية بتفاعل المياه والتربة والنباتات والمتعضّيات الصغرية والهواء[٢٥]. وتشمل هذه الأنظمة المعالجة الأرضية والنباتات المائية العائمة والأراضي الرطبة الاصطناعية. ويسبق المعالجة الطبيعية عادة نوع من المعالجة الابتدائية الميكانيكية يستهدف نزع الأجسام الصلبة الكبيرة. وفي حال توفر مساحة أرض مناسبة،

(٢٥) Metcalf and Eddy, Inc., *Wastewater engineering*. 3rd ed.، مرجع سق ذكره.

تشكل هذه الأنظمة الحلّ الأكثر فعالية من حيث كلفة الإنشاء والتشغيل، ولذلك تناسب المجتمعات الصغيرة والمناطق الريفية[٢٦].

١- المعالجة الأرضية

تعمل المعالجة الأرضية عن طريق تسليط مُراقَب للمياه العادمة فوق الأرض بمعدل متناسب مع العمليّات الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية الطبيعية التي تحدث فوق التربة وتحتها. وهناك ثلاثة أنواع أساسيّة لأنظمة المعالجة الأرضية هي: المعدل البطيء، والفيض، والترشّح السريع.

(أ) المعدل البطيء

أنظمة المعدل البطيء هي النوع الأكثر استخداماً والأكثر فعالية في المعالجة الأرضية للمياه العادمة البلدية والصناعية. وتتضمّن هذه التكنولوجيا عمليّات معالجة المياه العادمة وإعادة استخدام المياه وتغذية المحاصيل وصرف المياه العادمة في آن واحد. وتسلط المياه العادمة على الأرض المزروعة باستخدام تقنيّاتٍ متعدّدة ومنها الرش وري الأخاديد المتقطع، للحفاظ على ظروف هوائية في التربة. وتستهلك المياه إمّا عن طريق التبخّر أو الترشيح عبر التربة بحيث تعالج المياه خلال ترشيحها. وتدخل المياه المرشّحة طبقة المياه الجوفية، أو تعترضها المياه السطحية الطبيعية، أو تجمع في آبار لاسترجاع المياه[٢٧].

وتُصنّف هذه الأنظمة حسب أهدافها إلى نوعين: الأوّل هدفه معالجة المياه العادمة، والثاني ري المحاصيل حيث تسلط المياه العادمة بكمية كافية لاحتياجات المحاصيل.

(ب) الترشيح السريع

الترشيح السريع من أكثر عمليّات معالجة المياه العادمة تركيزاً، إذ تسلط حمولات عضوية وهيدروليكية مرتفعة نسبياً على أحواض ضحلة. وتستخدم عملية الترشيح السريع وطأة التربة للمعالجة الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية. فالترشيح الفيزيائي يجري على سطح التربة وداخل وطأتها؛ والترسيب الكيميائي والتبادل الأيوني والامتزاز خلال تسرّب المياه عبر التربة؛ والأكسدة البيولوجية والتمثل والاختزال في الطبقة العليا من التربة. ولا تكسى هذه الأراضي بالخُضرة. وتصمّم أنظمة الترشيح السريع بهدف إعادة تغذية المياه الجوفية وتخزين المياه المعالجة مؤقتاً[٢٨] (انظر الشكل ١٢).

---

(٢٦) S. C. Reed, E. J. Middlebrooks and R. W. Crites, *Natural systems for waste management and treatment*. New York, McGraw Hill, Inc, 1988.

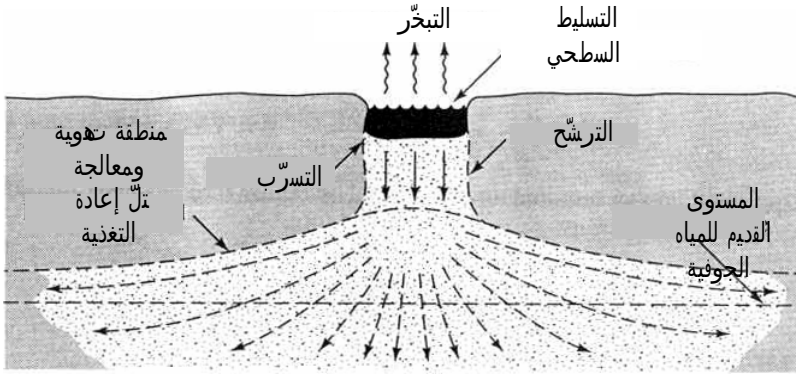
Metcalf and Eddy, Inc, *Wastewater engineering*. 3rd ed.، مرجع سبق ذكره.

(٢٧) المرجع نفسه.

(٢٨) Sanks, R.L., and Asano, T., *Land treatment and disposal of municipal and industrial wastewater*. Michigan, Ann Arbor Science, 1976.

- Metcalf and Eddy, Inc., *Wastewater engineering*. 3rd ed.، مرجع سبق ذكره.

الشكل ١٢- نظام معالجة الترشيح السريع

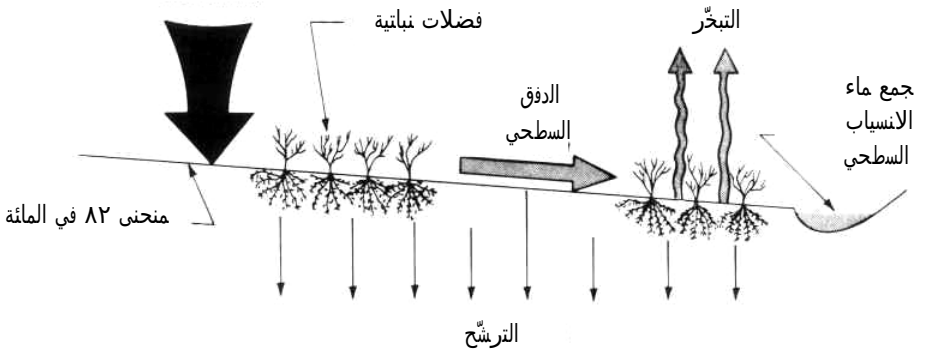


المصدر: Metcalf and Eddy Inc., *Wastewater engineering.* 3rd ed.، مرجع سبق ذكره.

(ج) الجريان السطحي

خلال عمليّة الجريان السطحي، تُعالج المياه العادمة خلال جريانها عبر شبكة من المنحدرات المكتسية بالخضرة، وتُسلّط بتقطع على القسم الأعلى لكلّ منحدر بحيث تجري إلى أسفل المنحدر حتى تصل إلى قناة لجمع المياه المنسابة على السطح. وتُنشر المياه بواسطة مرشّات أو أنابيب ذات مصدّات. وتُستخدم عمليّة الجريان السطحي على تربة ذات سطح غير منفذ للمياه. وتخضع المياه العادمة خلال جريانها لعدد من العمليّات الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية، وتصمّم عمليّات الجريان السطحي لإجراء معالجة ثانوية أو متقدمة أو لنزع المغذّيات[٢٩] (انظر الشكل ١٣).

الشكل ١٣- نظام معالجة الجريان السطحي



المصدر: مقتبس من: Qasim، مرجع سبق ذكره.

(٢٩) - Sanks. and Asano، مرجع سبق ذكره.

- Reed, Middlebrooks, and Crites، مرجع سبق ذكره.

٢- الأراضي الرطبة الاصطناعية

الأراضي الرطبة هي أراض مغمورة بالمياه على عمق أقلّ من قدمين، تنمو فيها نباتات ظاهرة بحيث تؤمّن سطوحاً تساعد على تثبيت طبقة رقيقة من البكتيريا، وتساعد على ترشيح وامتزاز مكوّنات المياه العادمة، وتحويل الأكسجين إلى عمود المياه والتحكم بنمو الطحالب عبر حصر دخول ضوء الشمس. وهناك نوعان من الأراضي الرطبة الاصطناعية، فالنوع الأوّل يتكون من أحواض ضحلة متوازية ذات قاع غير منفذ للمياه ونباتات ظاهرة، تعالج عبر جذوعها وجذورها المياه العادمة المصفاة سابقاً؛ والنوع الثاني يتكوّن من الأراضي الرطبة الاصطناعية من قنوات ممتلئة بالحصى والرمل ووسائط أخرى نافذة للمياه حيث تزرع نباتات ظاهرة، وتُعالج المياه العادمة من خلال مرورها عبر المرشّح المكوّن من الرمل والنباتات. وتصمّم هذه الأنظمة بهدف المعالجة الثانوية أو المتقدّمة.

٣- النباتات المائية العائمة

يشبه نظام النباتات المائية العائمة نظام الأراضي الرطبة من النوع الأول المذكور آنفاً، إلا أن النباتات المستخدمة هي من النوع العائم، والمياه أعمق منها في الأراضي الرطبة، وتُقارب الستة أقدام. والنباتات العائمة تساعد على منع ضوء الشمس وتخفيف نمو الطحالب، وقد أثبتت فعاليتها في تخفيف الطلب البيولوجي على الأكسجين، والنيتروجين، ونزع المعادن والمواد العضوية النزرة، ونزع الطحالب من البحيرات وتثبيت المياه الخارجة. ويمكن استعمال التهوية الإضافية للنباتات العائمة بهدف زيادة قدرة المعالجة والحفاظ على الظروف الهوائية اللازمة للتحكم البيولوجي بالبعوض[٣٠].

ويتضمن الجدول ٨ مقارنة لعمليات المعالجة الطبيعية الأساسية.

الجدول ٨- مقارنة عمليات المعالجة الطبيعية الأساسية

الخاصة	المعدّل البطيء	الترشيح السريع	الدفق السطحي	الأرض الرطبة	النباتات المائية العائمة
الظروف المناخية	تخزين ضروري خلال الطقس البارد وهطول الأمطار	لا إمكان لتعديل العملية في الطقس البارد	تخزين ضروري خلال الطقس البارد وهطول الأمطار	التخزين قد يكون ضرورياً خلال الطقس البارد	التخزين قد يكون ضرورياً خلال الطقس البارد
العمق للمياه الجوفية	٢ إلى ٣ أقدام على الأقلّ	١٠ أقدام (عمق أقلّ مقبول في حالة الصرف السفلي)	غير حرج	غير حرج	غير حرج
الانحدار	أقل من ١٥ في المائة فوق الأراضي المزروعة؛ أقلّ من ٤٠ في المائة فوق الأحراج	غير حرج؛ غير أنّ الانحدار المفرط يتطلّب الكثير من أعمال الحفر	نهاية منحدر ١ إلى ٨ في المائة	عادة أقلّ من ٥ في المائة	عادة أقلّ من ٥ في المائة

(٣٠) Metcalf and Eddy, Inc. *Wastewater engineering*, 3rd ed.، مرجع سبق ذكره.

الجدول ٨ (تابع)

الخاصة	المعدّل البطيء	الترشيح السريع	الدفق السطحي	الأرض الرطبة	النباتات المائية العائمة
إنفاذية التربة	بطيئة باعتدال إلى سريعة باعتدال	سريعة (رمل وطفال رملي)	بطئ (صلصال، طين، وتربة ذات حواجز غير منفذة)	بطيئة إلى معتدلة	بطيئة إلى معتدلة
تقنية التسليط	مرشّات أو تسليط سطحي	تسليط سطحي عادةً	مرشّات أو تسليط سطحي	مرشّات أو تسليط سطحي	تسليط سطحي
المعالجة الدنيا قبل التسليط	الترسيب الأوّلي	الترسيب الأوّلي	التصفية	الترسيب الأوّلي	الترسيب الأوّلي
التخلّص من المياه العادمة المسلّطة	التبخّر والنتح والترشيح	الترشّح أساساً	الانسياب السطحي والتبخّر مع بعض الترشّح	التبخّر والنتح والترشّح والانسياب السطحي	بعض التبخّر والنتح
الحاجة إلى الخضرة	ضرورية	اختيارية	ضرورية	ضرورية	ضرورية
نوعية المياه الخارجة المتوقّعة (مغ/ل)					
الطلب البيوكيميائي على الأكسجين	٢ >	٢ >	١٠ >	-	-
الجوامد المعلّقة	١ >	٢ >	١٥ >	-	-
نتروجين الأمونيا	٠,٥ >	٠,٥ >	١ >	-	-
مجموع النتروجين	٣ >	١٠ >	٥ >	-	-
مجموع الفوسفور	٠,١ >	١ >	٤ >	-	-

المصدر: Metcalf and Eddy, Inc., *Wastewater engineering*, 3rd ed.، مرجع سبق ذكره.

S. C. Reed, E. J. Middlebrooks and R. W. Crites, *Natural systems for waste management and treatment*. New York, McGraw Hill, 1988.

دال- معالجة الحمأة وصرفها

تحتوي حمأة المجاري على أجسام صلبة عضوية وغير عضوية توجد أصلاً في النفايات الخام وتنزع خلال التصفية الأوّليّة، وعلى أجسام صلبة عضوية تنتج خلال المعالجة الثانوية أو البيولوجية وتنزع في مرحلة التصفية الثانوية أو التكثيف المنفصل. وتتخذ الحمأة شكل سائل أو سائل شبه صلب تتراوح فيه نسبة الجوامد بين ٠,٢٥ و١٢ في المائة من الوزن، حسب عمليّة المعالجة المستخدمة[٣١]. وتعتبر عمليات مناولة ومعالجة وصرف الحمأة معقدة بسبب المحتويات الكريهة الموجودة فيها والتي تتغيّر حسب مصدر المياه العادمة وعمليّات المعالجة المطبّقة. وتستخدم عمليّات التكثيف والتكييف ونزح المياه والتجفيف لنزع الرطوبة من الحمأة، بينما تستخدم عمليّات الهضم والتسميد والحرق والأكسدة بالهواء الرطب والمفاعلات ذات الماسورة الرأسية لمعالجة الحمأة أو تثبيت المواد العضوية فيها. وتعرض الفقرات التالية العمليات الأكثر استخداماً في معالجة الحمأة.

(٣١) McGhee, T.J., *Water Supply and Sewerage*. New York, McGraw Hill, 1991.

١- التكثيف

تُكثف الحمأة بهدف زيادة محتواها من الأجسام الصلبة عن طريق نزع جزء من المحتوى السائل. وتؤدّي زيادة بسيطة في محتوى المواد الصلبة (من ٣ إلى ٦ في المائة) إلى تقليص هام في حجم الحمأة (حتى ٥٠ في المائة)، وبالتالي تقليص الحجم المطلوب لوحدات المعالجة اللاحقة[٣٢]. ويجري تكثيف الحمأة عادة بطرائق فيزيائية منها الترسيب بفعل الجاذبية والتعويم والفرز بالطرد أو النبذ (انظر الجدول ٩).

الجدول ٩- وصف التكنولوجيات الشائعة لتكثيف الحمأة

طريقة التكثيف	الوصف	كثافة الجوامد المحقّقة
الثقلي	يشبه التكثيف الثقلي حوض الترسيب الدائري التقليدي. وتدخل الحمأة المخففة إلى بئر التغذية وتترك لتترسّب وترصّ قبل سحبها من أسفل الحوض. وتكشط الحمأة بأوتاد عمودية بهدف تحريكها بلطف والمساعدة على تكثيفها عبر إطلاق الغاز والمياه المحبوسة داخلها. وتضخ الحمأة المكثفة إلى هاضمات أو معدات نزح المياه بينما يعاد الطفو إلى منشأة المنبع في محطة المعالجة أو إلى خزّان الترسيب الأولي. وهذه الطريقة أكثر فعالية للحمأة الأولية.	-
التعويم	يستخدم التعويم بالهواء المذاب لتكثيف الحمأة الناجمة عن عمليات المعالجة البيولوجية ذات النمو المعلق. وتتضمّن إدخال الهواء إلى محلول الحمأة المضغوطة. وعندما يزال الضغط عن محلول الحمأة، يرتفع الهواء المذاب فقاقيع صغيرة حاملة معها الحمأة إلى السطح حيث تكشط.	٣,٥ إلى ٥ في المائة
الفرز الطاردي	تستخدم الفرّازات الطاردة لتكثيف ونزح المياه من نفايات الحمأة المنشطة. وتتضمّن ترسيب جسيمات الحمأة تحت تأثير قوى الفرز الطاردة. وهناك نوعان أساسيان من الفرّازات الطاردة هي الحوض الصلب والسلة غير المثقبة. • تتألّف الفرّازة الطاردة ذات الحوض الصلب من حوض طويل أفقي ومتدرّج من نهاية واحدة. وتدخل الحمأة باستمرار وتتركّز الجوامد على المحيط. • تتألّف الفرّازة الطاردة ذات السلة غير المثقبة من حوض عمودي دوّار يعمل بتقطع. وتتجمّع الجوامد على حائط الحوض بينما يصفق السائل.	٤ إلى ٦ في المائة ٨ إلى ١٠ في المائة
الحزام الثقلي	يتألّف هذا النوع من المكثفات من حزام ثقلي متحرك فوق أسطوانات تقودها وحدة قيادة متعدّدة السرعات. وتستخدم لتكثيف الحمأة الخام والحمأة المهضومة بعد تكييفها بإضافة البوليمرات. وتدخل الحمأة المكيّفة إلى علبة ثمّ توزّع بطريقة متساوية على عرض الحزام المتحرّك. وعندما ترشّح المياه عبر الحزام، تحمل الحمأة إلى طرف الصرف للمكثّف.	٣ إلى ٦ في المائة
الاسطوانة الدوّارة	يتألّف هذا النوع من المكثفات من نظام تكييف لنفايات الحمأة المنشطة ومصافٍ أسطوانية دوارة. وفي المرحلة الأولى، تمزج البوليمرات مع الحمأة الرقيقة في اسطوانة التكييف ثمّ تمرّر إلى المصافي الأسطوانية الدوّرة التي تفصل الجوامد المتلبّدة من المياه.	٥ إلى ٩ في المائة

المصدر: Metcalf and Eddy Inc., *Wastewater engineering*, 3rd ed.، مرجع سبق ذكره.

(٣٢) المرجع نفسه.

٢- التثبيت

تثبّت الحمأة تمهيداً لتقليص محتواها من العوامل الممرضة وإزالة الروائح المزعجة وتخفيف أو إزالة احتمال التعفن. وتعرض الفقرات التالية خمس تكنولوجيات مُستخدمة في تثبيت الحمأة.

(أ) التثبيت بالكلس

خلال هذه العملية، يُضاف الكلس إلى الحمأة الخام لرفع مستوى الأس الهيدروجيني إلى ١٢ أو أعلى، والهدف من ذلك كبت المتعضّيات الصغريّة، وبالتالي تخفيف أو إزالة احتمال التعفّن وانبعاث الروائح. ويُستعمل الكلس المُطفأ والكلس الحيّ في أكثر الأحيان، ويُضاف إمّا قبل عملية نزع المياه أو بعدها.

(ب) العلاج الحراري

خلال هذه العمليّة، تعالج الحمأة بتسخينها في وعاء ضغط لتصل إلى حرارة ٢٦٠ درجة مئوية وضغط ٧٦٠ ٢ ألف نيوتُن لكلّ متر مربّع لمدة ٣٠ ثانية تقريباً. ويؤدي تعريض الحمأة لهذه الظروف إلى تحلل المركبات البروتينية وإتلاف الخلايا وإطلاق المركبات العضوية القابلة للذوبان والنتروجين. وتسهم هذه العملية أيضاً في تكييف الحمأة، بما أن النشاط الحراري يُطلق المياه المقيّدة ويؤدّي إلى تخثر الجوامد.

(ج) الهضم اللا هوائي للحمأة

تتضمّن هذه العمليّة الاختزال اللا هوائي للمواد العضوية في الحمأة عبر نشاطٍ بيولوجي. ويمكن استرجاع الميثان المُنتج وإعادة استخدامه للتسخين والحرق. وهناك خمسة أنواع من الهاضمات اللا هوائية الشائعة الاستخدام هي: المعدل العادي، والمعدل المرتفع، والهضم في مرحلتين، والهضم المنفصل والهضم الحراري (انظر الجدول ١٠).

الجدول ١٠- الهاضمات اللا هوائية الشائعة الاستخدام

نوع الهاضم	وصف الهاضم
المعدّل العادي	تتضمن هذه العملية من مرحلة واحدة، تتمّ فيها عمليّات الهضم والتكثيف وتشكيل الطفو. وتضاف الحمأة الخام إلى منطقة الهضم الناشط حيث يسخّن بمصدر خارجي. ويحافظ على ظروف معتدلة حرارياً في المفاعل، ويرتفع الغاز الناتج من العملية إلى السطح حاملا معه الشحوم والزيوت.
المعدّل المرتفع	في هذه العملية، تكون حمولة المواد الصلبة أكبر من عملية المعدّل العادي، وتمزج الحمأة عبر تمرير الغاز والضخ والمزج الميكانيكي.
الهضم في مرحلتين	تتضمّن هذه العملية خزّانين، يستعمل الأول للهضم وفيه معدّات للتسخين والمزج، ويستعمل الثاني لتخزين وتكثيف الحمأة المهضومة ولتشكيل طفو صاف.
الهضم المنفصل	هذه عملية حديثة نسبياً وتتضمّن الهضم المنفصل للحمأة الأولية والحمأة البيولوجية.
الهضم الحراري	يكون الهضم على حرارة تتراوح بين ٤٩ و٥٧ درجة مئوية. وتختصّ هذه العملية بمعدّل هضم سريع وإتلاف كبير للبكتيريا ونزح مياه محسّن للحمأة. غير أنّها تستهلك الكثير من الطاقة وتنتج طفواً ذا نوعية سيئة وتبعث الروائح.

المصدر: مقتبس من: Liu and Liptak، مرجع سبق ذكره.

(د) الهضم الهوائي للحمأة

يُشبه الهضم الهوائي عملية الحمأة المنشّطة، إذ يشمل أكسدة مباشرة للمواد القابلة للتحلـل الحيـوي والخلايا الميكروبيّة في خزّاناتٍ مفتوحة لمدّة طويلة من الزمن. وتكون التهوية إمّـا طبيعيـة أو باسـتخدام مُهَويات ميكانيكيّة. ويستحسن استخدام هذه العمليّة، مثلاً، لمعالجة نفايات الحمأة المنشّطة أو الحمأة الناجمـة عن محطات التهوية الممتدّة المصمّمة دون ترسيب أوّلي. ولهذه العمليّة محاسن عدة بالمقارنة مـع الهضـم اللا هوائي، وخاصةً لإنتاجها مادة ثابتة حيوياً واسترجاعها لمعظم قيمة السماد في الحمأة وسـهولة تشـغيلها وانخفاض كلفة إنشائها. وفي المقابل، يتسم تشغيل هذا النوع من الهاضمات بتأثر العملية كثيـراً بـالحرارة والموقع ونوع الخزّان.

(•) التسميد

يُستخدم التسميد لتثبيت الحمأة والصرف النهائي. وخلال هذه العمليّة، تتحلل المواد العضوية، بحيث تتناقص كمّية الجوامد المتطايرة بنسبة ٢٠ إلى ٣٠ في المائة، وتتلف المتعضّيات الصغرية المعوّيـة بسـبب ارتفاع حرارة السماد. ويضمّ التسميد العمليّات التالية: خلط الحمأة الجافة مع عامل التنفخ الحجمي؛ وتهويـة السماد بالخلط الميكانيكي أو إضافة الهواء؛ واستعادة عامل التنفخ الحجمي؛ والمعالجة الإضافيّة والتخـزين؛ والصرف النهائي.

والسماد الناتج من هذه العملية ثابت ويمكن استخدامه مكيفاً للتربة. ويُستعمل التسميد الهوائي أكثـر من التسميد اللا هوائي. وهناك ثلاثة أنظمة شائعة للتسميد الهوائي هي: الركم المهوّى الراكد، وركم الرياح، والتسميد داخل وعاء (انظر الجدول ١١).

الجدول ١١- أنظمة التسميد الهوائي

النوع	وصف العملية
الركم المهوّى الراكد	يتكوّن من شبكة تهوية يوضع فوقها خليط من الحمأة المنزوحة المياه وعامل التـنفخ. ويجـري المزج عبر اسطوانة دوّارة أو معبّئة أمامية. ويصفى السماد المعالج لاسترجاع عامل التنفخ.
ركم الرياح	تشبه هذه العملية الركم المهوّى الراكد بالنسبة لعمليات المزج والتصفية باستثناء استخدام التهويـة الميكانيكية. ويحافظ المزج المتقطع للسماد على الظروف الهوائية.
التسميد داخل وعاء	تجري العملية داخل وعاء حيث يحافظ على دفق الهواء والحرارة وتركيـز الأكسـجين بطـرق ميكانيكية.

المصدر: مقتبس من: Liu and Liptak، مرجع سبق ذكره.

٣- التكييف

يتضمّن التكييف معالجة الحمأة كيميائياً وفيزيائياً لتطوير خصائص نزح المياه. ومن أكثـر طرائـق التكييف شيوعاً إضافة المواد الكيميائية والمعالجة الحرارية. ومن الطرائـق الأخـرى للتكييـف التجميـد والتشعيع والتصويل(٣٣).

(٣٣) Qasim، مرجع سبق ذكره.

(أ) التكييف الكيميائي

يُرافق التكييف الكيميائي الأنظمة الميكانيكية لنزح المياه من الحمأة، إذ يُساعد على خفض الرطوبة في الحمأة من ٩٠-٩٩ في المائة إلى ٦٥-٨٥ في المائة، وذلك عن طريق تخثير الجوامد وإطلاق المياه الممتصّة. وتستخدم هذه العملية المواد الكيميائية العضوية وغير العضوية، ومن أكثر المكيّفات غير العضوية استعمالاً كلوريد الحديديك والكلس. فكلوريد الحديديك يكون، عند إضافته، مركبات أيونية مذابة ذات شحنة موجبة تعادل الجوامد ذات الشحنة السالبة في الحمأة، ممّا يؤدّي إلى تجمّعها. ويتفاعل كلوريد الحديديك أيضاً مع البيكربونات القلويّة في الحمأة، منتجاً الهيدروكسيد المساعد على التلبّد؛ والكلس الذي يُستخدم عادة مع أملاح الحديد، يتفاعل مع الحمأة منتجاً كربونات الكالسيوم، مما يزيد مساميّة الحمأة ويقلل انضغاطها.

وتستعمل البوليمرات العضوية أيضاً لتكييف الحمأة، وتذاب البولي إلكتروليتات العضوية في المياه لتشكل محلولاً متغيّر اللزوجة، وتلتصق الإلكتروليتات على سطح جزيئات الحمأة مسبّبةً لفظ المياه ومعادلة الشحنة وتكتّل الجزيئات[٣٤].

(ب) التكييف الحراري

تتضمّن هذه العملية تسخين الحمأة لغاية ١٢٠-٢٤٠ درجة مئوية في مفاعل بضغط ١٧٢٠-٢٧٦٠ ألف نيوتن لكلّ متر مربّع ولمدّة ١٥-٤٠ دقيقة. وتؤدّي الحرارة إلى تخثير الجوامد وتحليل التركيب الغرواني وخفض ميل الحمأة للمياه، بحيث تنتج حمأة مطهّرة ودون رائحة ومنزوعة المياه. غير أنّ السائل الطافي من وحدة المعالجة الحراريّة قد يحتاج إلى معالجة خاصة قبل تحويله إلى مجرى المياه العادمة بسبب ارتفاع الطلب البيولوجي على الأكسجين[٣٥].

٤- نزح المياه

يمكن استخدام طرائق عدة لنزح المياه من الحمأة، ويتعلق اختيار التقنيّة بخصائص الحمأة والمساحة المتاحة ومتطلبات الصرف النهائي. وعندما تتوفر مساحة الأرض اللازمة وتكون كمّيّة الحمأة صغيرة، تصبح الأنظمة الطبيعية لنزح المياه الأكثر ملاءمة. أمّا الأنظمة الميكانيكية فتضمّ المرشح الخوائي، والفرّازة النابذة، ومِكبس الترشيح، ومِكبس الترشيح الحزامي.

(أ) أحواض تجفيف الحمأة

تستخدم أحواض تجفيف الحمأة عادة لنزح المياه من الحمأة المهضومة. وبعد التجفيف، تصرف الحمأة في مدفنٍ للقمامة أو تُستعمل مكيفاً للتربة. ويتضمن الجدول ١٢ الأنواع المختلفة لأحواض تجفيف الحمأة.

---

(٣٤) المرجع نفسه.

(٣٥) المرجع نفسه.

الجدول ١٢- الأنواع المختلفة لأحواض تجفيف الحمأة

أحواض تجفيف الحمأة	وصف العملية
أحواض التجفيف الرملية التقليدية	تتكوّن أحواض التجفيف الرملية التقليدية من طبقة من الرمل الخشن فوق قاع من الحصى المدرّج تمرّ فيه أنابيب مثقوبة للتصريف. وتوضع الحمأة على الحوض وتترك لتجفّ بالتبخّر والصرف، وتزال الحمأة الجافة يدوياً.
أحواض التجفيف المرصوفة	تشبه أحواض التجفيف المرصوفة الأحواض التقليدية في نظام الصرف. وهناك نوعان من هذه الأحواض: نوع التصريف ونوع التصفيق، فالنوع الأول يتضمن تحريك الحمأة لتسهيل نزح المياه وتستخدم محمّلة أمامية لنزع الحمأة، والنوع الثاني أحواض مرصوفة غير نافذة ومنخفضة الكلفة. ويجري تصفيق السائل الطافي وتحريك الحمأة لتحسين التبخّر.
أحواض الأسلاك الاسفينية	تبني هذه الأحواض من وسائط اصطناعية كالفولاذ اللا صدوء والبولي يوريثان. ويجري التحكّم بعملية الصرف عبر صمّام في المخرج، بحيث تحسّن عملية نزح المياه.
تجفيف معزّز بالتفريغ	في هذا النظام، تسرّع عمليتا نزح المياه والتجفيف عبر تفريغ الجهة السفلية للمراشح المسامية.

المصدر: Qasim مرجع سبق ذكره.

Metcalf and Eddy, Inc., *Wastewater engineering*, 3rd ed.، مرجع سبق ذكره.

(ب) بحيرات التجفيف

تتألف بحيرات تجفيف الحمأة، الصالحة لمعالجة الحمأة المهضومة فقط، من أحواض ترابيّة ضحلة محاطة بحواجز ترابية. وتوضع الحمأة في البحيرة وتترك لتجفّ. ويصفى السائل الذي يطفو على سطح البحيرة ويُعاد إلى المحطة، ثم تزال كتلة الحمأة باستخدام آلات ميكانيكيّة[٣٦].

(ج) المرشح الخوائي

تتكوّن عمليّة الترشيح الخوائي من أسطوانة أفقية مغمورة جزئياً في خزان للحمأة المكّيفة. ويغطى سطح الاسطوانة بوسط مسامي ثمّ يقسّم إلى أجزاء حول محيطه. وعندما تدور الاسطوانة، تعمل الأجزاء بالتتابع باعتبارها واحدة من المناطق المختلفة الثلاث التالية: تكوين كتلة الحمأة، ونزح المياه من كتلة الحمأة، وصرف كتلة الحمأة (الشكل ١٤). ويعمل الفراغ داخل الاسطوانة على جذب الحمأة إلى وسط المرشح[٣٧].

(د) مِكبس الترشيح الحزامي

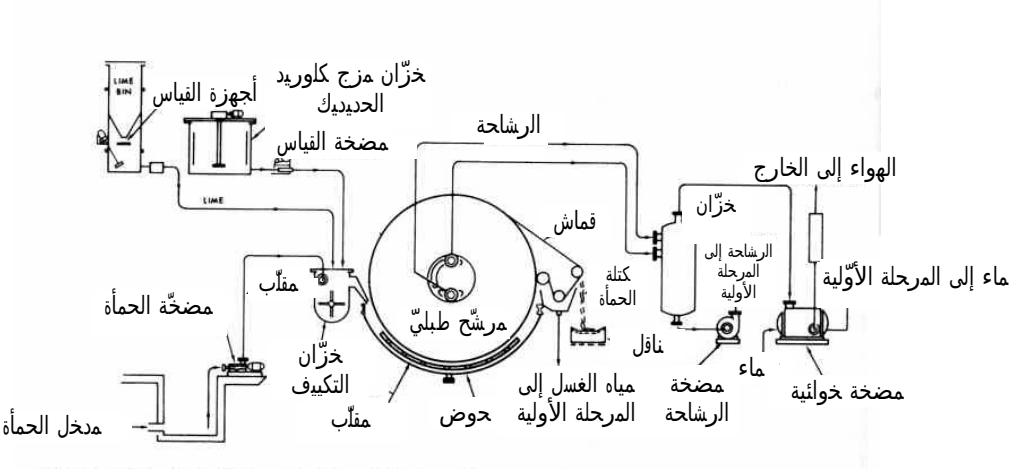
يستخدم مِكبس الترشيح الحزامي حزاماً واحداً أو حزامين متحرّكين لنزح المياه من الحمأة باستمرار. وتتضمّن العمليّة أربع مراحل أساسيّة هي: منطقة التكييف البوليمري، ومنطقة التصريف الثقلي، ومنطقة الضغط المنخفض ومنطقة الضغط المرتفع (الجدول ١٣).

---

(٣٦) Liu and. Liptak، مرجع سبق ذكره.

(٣٧) Qasim، مرجع سبق ذكره.

الشكل ١٤- نظام الترشيح الخوائيّ



المصدر: مقتبس من: Metcalf & Eddy, Inc., *Wastewater engineering*, 3rd ed. مرجع سبق ذكره.

الجدول ١٣- المراحل التشغيلية لمكبس الترشيح الحزامي

مرحلة الترشيح	وصف المرحلة
منطقة التكييف البوليمري	تتضمّن خزّاناً قرب المكبس واسطوانة دوّارة ملتصقة بالمكبس أو محقنة مستقيمة.
منطقة التصريف الثقلي	تتضمّن حزاماً مسطحاً أو مائلاً بدرجة صغيرة، وتركّز الحمأة عبر التصريف الثقليّ للمياه الجارية، ويمكن تعزيز هذه العملية بالتفريغ.
منطقة الضغط المنخفض	هي المنطقة التي يلتقي فيها الحزام العلوي مع الحزام السفلي وتكون الحمأة بين الحزامين. وتحضّر هذه المنطقة الحمأة بحيث تستطيع تحمّل قوى القص في منطقة الضغط المرتفع.
منطقة الضغط المرتفع	في هذه المرحلة، تبذل حركة الحزامين العلوي والسفلي قوى على الحمأة خلال مرورها عبر مجموعة من الاسطوانات المتناقصة القطر. وتنزع الحمأة المنتجة باستخدام رَيش كاشطة.

المصدر: Qasim، مرجع سبق ذكره.

(•) مِكبس الترشيح

تنزح المياه في مِكبس الترشيح تحت ضغط الحمأة. ومن محاسن هذه العمليّة التركيز المرتفع لكتلة الحمأة، وصفاء الرُشاحة، وأسر كمية كبيرة من الجوامد. غير أنّ النظام يتسم بالتعقيد الميكانيكي وارتفاع كلفة التشغيل. ومكابس الترشيح الشائعة الاستخدام هي على حجمين: الحجم الثابت والحجم المتغيّر.

ويتكون مكبس الترشيح ذو الحجم الثابت من مجموعة ألواح مستطيلة مُسندة وجهاً لوجه في وضعيّة عمودية على قماش مرشّح معلق فوق كلّ لوح، وتضخ الحمأة المكيّفة في الفراغ بين الألواح وتعرّض لضغطٍ مرتفع لمدّة تتراوح بين ساعة وثلاث ساعات، بحيث يخرج السائل عبر القماش وفتحات الخروج في الألواح. وبعد ذلك، تنفصل الألواح وتنزع الحمأة. ويشبه مكبس الترشيح المجوّف ذو الحجم

المتغيّر المكبس ذا الحجم الثابت مع فارقٍ واحد هو أنّ غشاءً مطاطياً يوضع بين الألواح لخفض حجم كتلة الحمأة خلال الضغط[٣٨].

٥- التجفيف

يستهدف تجفيف الحمأة خفض محتوى المياه لأقلّ من ١٠ في المائة عبر التبخّر، بحيث تصبح الحمأة صالحة لتحرق أو لتصنع سماداً. ويجري التجفيف بطريقة ميكانيكيّة عبر تسخين إضافيّ. ومن عمليّات التجفيف الشائعة الاستخدام: التجفيف الومضي، والتجفيف الرذيّ، والتجفيف الدوّار، والمتعدّد المَجمَرات (انظر الجدول ١٤).

الجدول ١٤- الوسائل الميكانيكية لتجفيف الحمأة

نوع التجفيف	وصف العملية
التجفيف الومضي	تسحق الحمأة في طاحونة قفصية أو بتقنية التعليق بالبخ بوجود هواء ساخن.
التجفيف الرذي	تدخل الحمأة السائلة إلى وعاء طارديّ. تؤدّي القوى الطاردية إلى ترذيذ الحمأة إلى جسيمات صغيرة، ترش في القسم الأعلى من غرفة التجفيف.
التجفيف الدوّار	تتضمّن هذه العملية التسخين المباشر وغير المباشر. ففي التسخين المباشر، تلامس الحمأة غازات ساخنة، بينما في التسخين غير المباشر، تحاط حجرة الحمأة ببخار.
التجفيف المتعدّد المجمَرات	تتضمّن هذه العملية مرور هواء ساخن ومواد اشتعال عبر الحمأة المسحوقة التي تمشّط باستمرار لإظهار سطوح جديدة.

المصدر: Metcalf and Eddy, Inc., *Wastewater engineering*. 3rd ed.، مرجع سبق ذكره.

٦- الاختزال الحراري

يتضمّن الاختزال الحراري للحمأة عمليّتين أساسيّتين هما: التحويل الجزئي أو الكلي للجوامد العضويّة إلى ثاني أكسيد الكربون ومياه عن طريق الحرق أو الأكسدة بالهواء الرطب؛ والأكسدة الجزئية وتطاير الجوامد العضويّة إمّا بالانحلال الحراري أو الاحتراق القليل الهواء مع إنتاج مواد طاقيّة كالغازات والزيت والقطران والفحم. وتستهدف هذه العمليّة خفض حجم الجوامد تمهيداً للصرف النهائي[٣٩] ويتضمن الجدول ١٥ عرضاً لطرائق حرق الحمأة المختلفة.

الجدول ١٥- طرائق حرق الحمأة

نوع المحرقة	وصف العملية
المحرقة المتعدّدة المجمرات	تضمّ وعاء فولاذياً مقسّماً من الداخل إلى عدة مجمرات. وتدخل الحمأة عبر سقف المحرقة باستخدام مغذية لولبية أو حزام ذي باب قلاب. وتدفع ذراع وأسنان التقليب الحمأة عبر المجمرة ثم تقع من الثقوب إلى المجمرة التالية وتستمرّ هذه العملية حتى يصرف الرماد المطهّر والمحمل بالفوسفور من القاع.

(٣٨) Metcalf and Eddy, Inc., *Wastewater engineering*, 3rd ed.، مرجع سبق ذكره.

(٣٩) المرجع نفسه.

الجدول ١٥ (تابع)

نوع المحرقة	وصف العملية
الأكسدة بالهواء الرطب	تتكوّن من مفاعل يعمل بحرارة مرتفعة (٢٠٠-٣٠٠ درجة مئوية) وضغط مرتفع (٥٠٠٠-٢٠٠٠٠ نيوتن لكلّ متر مربّع). ويؤكسد الهواء المضخ إلى المفاعل الحمأة في طور سائل. وتفصل البقايا الصلبة من السائل بالترسيب أو الترشيح المنفصل.
المحرقة ذات طبقة مميّعة	تتكوّن من وعاء فولاذي عمودي وأسطواني الشكل يحتوي على طبقة رمل وثقوب هواء مميّع لإنتاج واستبقاء الاشتعال. وتمزج الحمأة بسرعة في الطبقة المميعة بحركة دوامية مما يؤدّي إلى تبخّر المياه واشتعال جوامد الحمأة.

المصدر: Metcalf and Eddy, Inc., *Wastewater Engineering*, 3rd ed.، مرجع سبق ذكره.

٧- صرف وإعادة استخدام الحمأة

تصرف الحمأة عادة في مدافن النفايات والبحيرات. غير أنّ منافع استخدام الحمأة تلاقي رواجاً أوسع حالياً، إذ يمكن استخدام الحمأة المعالجة والمهضومة مكيفاً للتربة، وكذلك معالجتها كيميائياً لاستعمالها غطاءً لمدافن القمامة أو لمشاريع استصلاح وتجميل الأراضي.

هاء- الاتجاهات والاهتمامات الجديدة(٤٠)

يزداد استخدام الوسائل الحاسوبية المتطوّرة في ديناميكا الموائع لدى تصميم العمليّات الجديدة للمعالجة، ومنها التطهير بالإشعاعات فوق البنفسجية وخزّانات الترسيب المتطوّرة. كما تستخدم هذه الوسائل الحاسوبيّة لتطوير أداء المحطات القائمة بدمجها مع نظام التحكم بالعمليّات.

وأصبح استهلاك الطاقة عاملاً أساسياً في تصميم وتشغيل محطات معالجة المياه العادمة. فبعض العمليّات، ومنها التهوية في المعالجة البيولوجية، تستهلك كمّيّة كبيرة من الطاقة، ولذلك من الأهمية لدى تصميم هذه العمليات، اختيار معدّات فعالة من حيث استهلاكها للطاقة وتطوير وسائل لاسترجاع الطاقة.

وإزاء الاتجاه نحو خفض بقايا الكلور في مياه الصرف المعالجة، يزداد استخدام وحدات نزع الكلور والوسائل البديلة عن التطهير بالكلور، كالتشعيع فوق البنفسجي.

ويؤدّي تقادم وصغر سعة البنية الأساسية لمعالجة المياه العادمة في بلدان عدّة إلى تزايد الاهتمام بدراسة وسائل تحسين الأداء وزيادة سعة محطات المعالجة القائمة.

وتشهد المياه العادمة الصناعية تغيّراً في خصائصها بسبب تطوّر العمليّات الصناعية التي تنتج هذه المياه. وتحتوي المياه العادمة الصناعية على كميات متزايد من معادن ثقيلة ومركبات عضوية اصطناعية، ممّا يتطلب تكنولوجيات جديدة لنزعها. وتركز الجهود الحالية على تطوير تقنيّات جديدة للمعالجة أكثر فعالية وأقل حجماً، كما تعمل الشركات الخاصة على تطوير عمليّات مسجّلة.

(٤٠) Metcalf and Eddy, Inc., *Wastewater engineering: treatment and reuse. 4th ed. New York,* McGraw Hill, Inc., 2002.

ثالثاً- إدارة المياه العادمة المعالجة

تستخدم المياه العادمة البلدية المعالجة بالدرجة الأولى لريّ المناطق الزراعية والمناظر الطبيعية، ولتغذية طبقات المياه الجوفية، ولاستخدامات ترفيهية. كما يمكن إعادة تدوير هذه المياه في الصناعة أو استعمالها للشرب. وفي حال عدم استخدامها، تصرف عادة في جسمٍ مائيّ، وتعمل الأنظمة والمبادϑ التوجيهية والسياسات البيئية على ضمان الشروط الملائمة لصرف المياه العادمة المعالجة.

ألف- استرجاع وإعادة استخدام مياه الصرف

إزاء تزايد الطلب على المياه، والاستهلاك غير المستدام لموارد المياه الطبيعية، يلقى موضوع استرجاع وإعادة استخدام مياه الصرف اهتماماً متزايداً في الآونة الأخيرة. وتعتبر نوعية المياه المسترجعة شأناً أساسياً في تطبيقات إعادة الاستخدام، وتحدّد تسلسل عملية معالجة المياه العادمة. ويصف هذا القسم التطبيقات المختلفة لإعادة استخدام مياه الصرف مع التركيز على نوعية المياه المسترجعة.

١- الري

يمكن إعادة استخدام المياه العادمة المعالجة لري المحاصيل والمناظر الطبيعية. وتعتبر نوعية المياه المعالجة وملاءمتها لنمو الزرع العامل الأساسي في هذا التطبيق. ولبعض مكوّنات المياه المسترجعة أهمية خاصة في الري الزراعي، ومنها التركيزات المرتفعة للجوامد المذابة والمواد الكيميائية السامة والكلور المترسب والمغذيات. ومن الاعتبارات البالغة الأهمية أيضاً المخاطر التي يطرحها، على الصحة والسلامة العامة، احتمال وجود عوامل ممرضة جرثومية، وديدان وكائنات وحيدة الخلّية وفيروسات. وتختلف أهمية هذه العوامل حسب الاستخدام في الري ودرجة التلامس البشري. ومن العوامل المقيِّدة لاستخدام المياه العادمة المعالجة في الري تسويق المحاصيل وتقبل العامة، وتلوّث المياه السطحية والجوفية، وارتفاع تكاليف ضخ المياه المسترجعة إلى الأراضي الزراعية(٤١).

٢- الاستخدام الصناعي

المياه العادمة المسترجعة هي مصدر مثالي للاستخدامات الصناعية، لأن العمليات الصناعية، ومنها التبريد التبخيري وتغذية المِرجَل، لا تتطلب مياه فائقة الجودة. ولكل استخدام قيودٌ تحد من قابليته تطبيقه، فاستخدام المياه المسترجعة في أبراج التبريد، مثلاً، يسبب مشاكل عدة منها التقشّر والتآكل والنمو البيولوجي والحشف والإرغاء، ويسبب استخدام المياه العذبة المشاكل ذاتها، ولكن بمعدل تكرار أقل. أما في تغذية المِرجل، فينبغي خفض عسر المياه ونزع المعادن من المياه العادمة قبل استخدامها(٤٢).

٣- الاستخدامات الترفيهية

تستخدم المياه المسترجعة لأغراض ترفيهية تشمل صيانة المناظر الطبيعية والخزانات الجمالية، واحتجاز المياه والنوافير، وصناعة الثلج، وتربية السمك، وتغذية البحيرات المخصّصة للسباحة والصيد

---

(٤١) Qasim، مرجع سبق ذكره.

(٤٢) D.R. Rowe and I.H. Abdel-Magid، *Handbook of wastewater reclamation and reuse*. Boca Raton, Lewis, 1995.

والقوارب[٤٣]. ويحدّد المستوى المطلوب لمعالجة المياه المسترجعة حسب الاستخدام المقصود، ويُرفع مع درجة التلامس البشري. فللاستخدام الترفيهي غير المقيّد، مثلاً، تعالج المياه بالتخثر والترشيح والتطهير للحصول على عدد بكتيريا الكوليفورم أقلّ من ٣ في كلّ ١٠٠ مليتر[٤٤].

٤- تغذية طبقات المياه الجوفية

تساعد تغذية طبقات المياه الجوفية في المحافظة على مستوياتها وحمايتها من تسرّب المياه المالحة، كما تكوّن طريقة لحفظ المياه المسترجعة للاستعمال المستقبلي. وتجري تغذية المياه الجوفية بالنشر السطحي في أحواض أو الحقن المباشر في مجاري المياه الجوفية. فطريقة النشر السطحي تستخدم الغمر والتخديد والأراضي الرطبة الاصطناعيّة وأحواض التسريب، وتحسن نوعية المياه المسترجعة كثيراً بسبب ترشّحها عبر التربة والمنطقة غير المشبعة ومجمع المياه الجوفية؛ وطريقة الحقن المباشر مكلفةً بسبب ارتفاع كلفة معالجة مياه الصرف وكلفة معدّات الحقن. ومن أخطار تغذية طبقات المياه الجوفية بمياهٍ مسترجعة احتمال التلوّث[٤٥].

٥- إعادة الاستخدام كمياه للشرب

يثير استخدام المياه المسترجعة للشرب حذراً شديداً، بسبب رفض العامّة ومخاطر الصحة والسلامة. ومع الأبحاث الشاملة التي أجريت في هذا المجال، يواجه هذا الاستخدام عدة قيود، ولا سيّما في وضع معيار مناسب لنوعية المياه. ولذلك يقتصر استخدام المياه العادمة البلدية المسترجعة للشرب على الحالات القصوى.

باء- صرف المياه العادمة

تصرف المياه العادمة المُعالجة، إذا لم يُعد استخدامها، في مواقع برّية أو في أجسامٍ مائية. والصرف في الأجسام المائية هو الأكثر شيوعاً بسبب الاستفادة من قدرة المياه الطبيعية على التنقية الذاتية. ومع ذلك، من الضروري إجراء عمليّة الصرف بطريقة صحيحة كي لا تتأثر البيئة المستقبلة سلباً. فالكمّيات المفرطة من المواد العضوية يمكن أن تسبّب النمو السريع للبكتيريا واستنفاد موارد الأكسجين المذابة في الجسم المائي، وتغييرات درجة الحموضة أو تركيزات بعض المجموعات العضوية وغير العضوية يمكن أن تكون سامةً لبعض أشكال الحياة. ولذلك ينبغي أن تصمّم مخارج التصريف بحيث تضمن تشتيت المياه المسترجعة في المياه المستقبلة لمنع التلوّث الموضعي. وتختلف عوامل مزج وتشتيت المياه العادمة حسب خصائص المياه المستقبلة ومنها سرعة التدفق وانعكاس التيّار ودوران الريح وتكوّن طبقات بسبب الملوحة والحرارة[٤٦]. ولا بد من أخذ حرارة وملوحة المياه المسترجعة في الاعتبار. وتصرف المياه العادمة عادة في نقطة من مجرى النهر أسفل من نقاط سحب المياه للاستهلاك البشري.

---

(٤٣) Qasim، مرجع سبق ذكره.

(٤٤) Rowe and Abde-Magid، مرجع سبق ذكره.

(٤٥) Qasim، مرجع سبق ذكره.

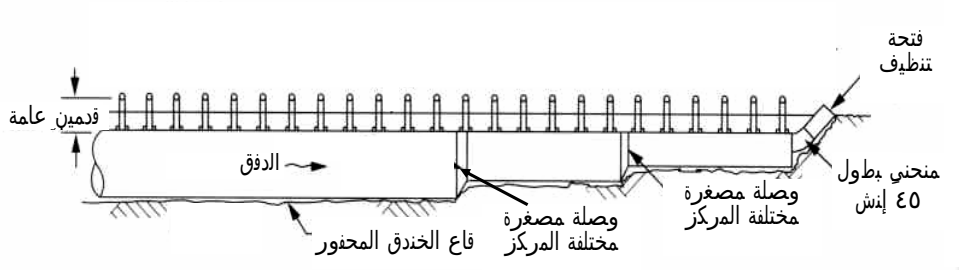
(٤٦) R.L. Droste *Theory and practice of water and wastewater treatment*. New York, John Wiley and Sons, Inc., 1996.

وتعرض الفقرات التالية الاعتبارات الأساسية لدى صرف المياه العادمة المعالجة في كافة أشكال الأجسام المائية، وضمنها الأنهار والمجاري والبحيرات والبحار والمحيطات.

١- الصرف في الأنهار والمجاري

عند صرف المياه العادمة المسترجعة في الأنهار، ينبغي تأمين مزج عمودي سريع للمياه على عمق النهر كاملا وتجنب مشاكل الرغوة. ويمكن الحصول على هذا المزج باستخدام ناشرة متعدّدة الفوهات تمتدّ على عرض النهر (الشكل ١٥).

الشكل ١٥- نموذج ناشرة الصرف في الأنهار



المصدر: مقتبس من: Metcalf and Eddy, Inc., *Wastewater engineering*, 3rd ed.، مرجع سبق ذكره.

٢- الصرف في البحيرات

تتكون في البحيرات طبقات حرارية لأنها أكثر امتداداً وعمقاً من الأنهار، ولا تمتزج فيها المياه كفاية بسبب ضعف التيّارات. وهكذا تتشكل في عمق البحيرة طبقة باردة ينخفض فيها مستوى الأكسجين المذاب، ويُبطئ تحلل المواد العضوية. ولذلك ينبغي تأمين مزج كاف لتفادي تشكيل طبقة لا هوائية. وفي البحيرات الضحلة، تنشر المياه العادمة باستخدام تيارات مولدة بالريح لتأمين مزج ملائم.

٣- الصرف في البحار والمحيطات

تصرف المياه العادمة غالباً في المحيطات لأنّ لها قدرة كبيرة على الاستيعاب. وبما أن المياه العادمة أقلّ كثافة من مياه البحر، تكوّن لدى صرفها عموداً سريع التصاعد، يؤدّي إلى جلب كمّيات كبيرة من المياه المحيطة، وبالتالي إلى تخفيف المياه العادمة(٤٧). ويحمل مخرج التصريف المياه العادمة إلى نقطة بعيدة عن الشاطئ عبر أنبوب مدفون في قاع البحر، ويجري الصرف عبر مخرج ذي ثقب واحد أو عدّة ثقوب يشبه المخرج النهري.

جيم- المبادئ التوجيهية والمعايير المتعلقة بالمياه العادمة

تستهدف المعايير البيئية ضمان تأثيرات مقبولة على المياه المحيطة بمخرج صرف المياه العادمة المعالجة. وتحدّد هذه المعايير مستوى المعالجة المطلوب، وموقع الصرف، وبنية المخارج.

(٤٧) Metcalf and Eddy, Inc., *Wastewater engineering*, 3rd ed.، مرجع سبق ذكره.

وتختلف أنظمة وإجراءات صرف المياه العادمة بين بلد وآخر، ويجسد التطوّر المستمرّ لهذه الأنظمة القلق المتزايد حيال حماية المياه المحيطة. ففي عام ١٩٧٢، طوّرت وكالة حماية البيئة التابعة للولايات المتحدة الأمريكية نظاماً وطنياً معروفاً باسم (NPDES National Pollutant Discharge Elimination System)، الهدف منه منع صرف الملوّثات والتحكّم بالمياه الملوّثة عن طريق تنظيم نقاط صرف الملوّثات في المياه (انظر الجدول ١٦). وحسب هذا النظام، يُفرض على المنشآت الصناعية والبلدية وغيرها الحصول على رخص لصرف المياه العادمة مباشرة في المياه السطحية. ومن ضمن هذا البرنامج، وضعت الوكالة معايير متعلقة بالمعالجة الثانوية، تخصّ محطات المعالجة الحكومية، وتجسد أداء مصانع المعالجة الثانوية للمياه العادمة. وتنطبق هذه الأنظمة التكنولوجية على جميع مصانع معالجة المياه العادمة البلدية وتحدّد المستوى الأدنى لجودة المياه المسترجعة باستخدام المعالجة الثانوية من حيث الطلب البيولوجي الكيميائي على الأكسجين في خمسة أيام وكمّية الأجسام الصلبة العالقة[٤٨].

الجدول ١٦- معايير المياه الخارجة من محطات معالجة المياه العادمة

المتغير	NPDES[أ]			EC EDRWD[ب]	
	معدّل التركيز لـ ٣٠ يوم	معدّل التركيز لـ ٧ أيام	النسبة المئوية للإزالة[ج]	التركيز (مغ/ل)	نسبة الإزالة[ج]
الحاجة الكيميائية الإحيائية للأكسجين في خمسة أيام	٣٠ مغ/ل	٤٥ مغ/ل	٨٥	٢٥	٩٠-٧٠
مجموع الأجسام الصلبة المعلقة	٣٠ مغ/ل	٤٥ مغ/ل	٨٥	٦٠-٣٥	٩٠-٧٠
الأس الهيدروجيني	٩-٦	-	-	-	-
الطلب الكيميائي على الأكسجين	-	-	-	١٢٥	٧٥
مجموع النتروجين[د]	-	-	-	١٥-١٠	٨٠-٧٠
مجموع الفوسفور[د]	-	-	-	٢-١	٨٠

المصادر: United States Environmental Protection Agency, *National Pollutant Discharge Elimination System: secondary treatment standards (2000).* http://cfpub.epa.gov/npdes/techbasedpermitting/sectreat.cfm.

World Bank, *Municipal wastewater treatment in Central and Eastern Europe: present situation and cost effective development Strategies*. The World Bank Group, Washington, D.C., 1998.

ملاحظات:

(أ) النظام الوطني الأمريكي لإلغاء صرف الملوّثات: معايير المعالجة.
(ب) شروط التوجيهات البيئية للجماعة الأوروبية بالنسبة لصرف المياه العادمة.
(ج) الإزالة نسبة لحمل المياه الداخلة.
(د) محصورة بالمناطق الحسّاسة حيث المياه عُرضة للتشبع بالمغذيات.

(٤٨) United States Environmental Protection Agency، *National Pollutant Discharge Elimination System: secondary treatment standards. (2002)*. http://cfpub.epa.gov/npdes/techbasedpermitting/sectreat.cfm.

دال- الاتجاهات والاهتمامات الجديدة[٤٩]

ينزع العالم نحو تقبل مبدأ إعادة استخدام المياه العادمة، غير أنّ القلق المتزايد حيال احتمال التلـوّث الميكروبي والكيميائي يطغى على إمكان استخدام المياه العادمة مباشرة للشرب. ولذلك بدأ تطوير وتطبيـق تكنولوجيات أكثر فعالية في نزع الملوّثات، ومنها تكنولوجيـات الأغشـية والامتـزاز الكربـوني والتبـادل الأيوني وغيرها.

وهناك اتجاهات لإنتاج حمأة نظيفة، أصغر حجما وأكثر أماناً للاستخدام. ولهذا الغرض، طـوّرت، من جهة، معدّات محسّنة الأداء كالفرازات الطاردّية والهاضمات، وعمليّات جديدة لإتلاف الجوامد المتطـايرة وإنتاج حمأة بيولوجية تقل فيها العوامل الممرضة؛ ومن جهة أخرى، يتناقص استخدام عمليّات الحرق والدفن في الأرض على أثر صدور قوانين صرف أكثر صرامة والوعي العام المتزايد بالبيئة.

---

(٤٩) Metcalf and Eddy, Inc.، *Wastewater engineering*، ٤th ed.

رابعاً- أجهزة التحكم المستخدمة في منشآت معالجة المياه العادمة

تشوب عمليّات معالجة المياه العادمة اضطرابات مستمرّة وتغيّرات لا يمكن كشفها بالدقّة والسرعة اللازمتين لتأمين تشغيل سليم للمنشأة باستخدام القياسات اليدوية. ومن أبرز الاضطرابات تلك المتعلقة بالمياه العادمة الداخلة إلى المصنع، ومنها تغيّر الدفق والتركيب البيولوجي والكيميائي والحرارة والكثافة(٥٠). وتتيح أجهزة التحكم الآلية مراقبة مستمرّة لمتغيّرات العمليّة، ونقلاً سريع للمعلومات إلى المُشغّل أو المدير، وتنفيذاً آلياً لتدابير تصحيحية حسب الحاجة. ويشهد استخدام أجهزة التحكم تزايداً مستمراً إزاء تعدد فوائدها في تحسين أداء العمليّات والأجهزة، وتسهيل العمل على المستخدمين(٥١).

ألف- نظام التحكم النموذجي

يتكون نظام التحكم النموذجي من الأجزاء التالية: جهاز القياس؛ وجهاز إرسال الإشارة؛ وشاشة لعرض البيانات؛ ونظام التحكم؛ والحاسوب؛ وغرفة التحكم المركزي(٥٢).

١- أجهزة القياس

تضم أجهزة القياس، المعروفة بأجهزة الاستشعار، أدوات ترصد وتقيس أو تحسب متغيّرات العمليّات. وتقع هذه المتغيّرات في ثلاث فئات هي: المتغيّرات الفيزيائية (كالدفق والضغط والمستوى والحرارة)؛ والكيميائية (كالأس الهيدروجيني، وإمكان خفض الأكسدة، والتعكر والتوصيل، والأكسجين المذاب، والكلور المتبقّي)؛ والبيولوجية (كمعدل استهلاك الأكسجين، ومعدل خفض مجموع الكربون العضوي، ومعدل نمو الحمأة). وتستطيع أجهزة الاستشعار قياس المتغيّرات بطرائق مباشرة أو غير مباشرة (استدلالية)، ومتصلة أو منفصلة، ومستمرة أو متقطّعة(٥٣).

٢- أجهزة إرسال الإشارة

تتولى أجهزة إرسال الإشارة نقل متغيّر العملية من جهاز الاستشعار إلى شاشة عرض البيانات أو نظام التحكم. ويكون الإرسال بطريقة ميكانيكية عبر حركة قلم أو مؤشّر أو عوّامة أو كابل، أو بطريقة هوائية عبر كاشف أو مضخم، أو بطريقة إلكترونية عبر توتر أو تيّار كهربائي أو أمد النبض أو طنين. وخلال الإرسال عبر توتر أو تيّار كهربائي، تنقل الإشارات بواسطة تيّار مستمرّ بقوّة مليأمبير أو إشارات توتر؛ وخلال الإرسال عبر أمد النبض، تكون مدّة إرسال التوتر متناسبة مع البيانات المقيسة؛ وخلال الإرسال عبر طنين، تستخدم خطوط الهاتف العادية.

---

(٥٠) H. D. Gilman et al.، *Instrumentation in wastewater treatment facilities. Manual of practice No. 21*. Virginia, Water Environment Federation, 1993.

(٥١) Qasim، مرجع سبق ذكره.

(٥٢) المرجع نفسه.

(٥٣) المرجع نفسه.

ومؤخّراً، بدأ تطوير واستخدام الإرسال اللاسلكي والإرسال عبر موجات دقيقة. وهذه الطريقة تناسب الحالات التي تتباعد فيها نقاط التجمّع أو لا تتوفر فيها خطوط للهاتف. ويزداد الاهتمام بأنظمة التحكم الإلكترونية واللاسلكية وذات الموجات الدقيقة لأسبابٍ عدّة، فالإشارات الإلكترونية تستطيع العمل عبر مسافاتٍ بعيدة دون تأخر زمني، وتلائم الحاسوب وتستطيع معالجة عدّة إشاراتٍ داخلة. ومع تقنيات السلامة الذاتية، أصبحت الأخطار الكهربائية معدومة. والأجهزة الإلكترونية هي صغيرة الحجم عادة وأقل كلفة ولا تستلزم أيّة صيانة.

٣- شاشة عرض البيانات

تعرض هذه الأجهزة البيانات عن العمليّات في نمطٍ سهلٍ للمشغل. ومن أكثر أجهزة العرض شيوعاً المؤشّرات والمسجّلات وحاسبات المجموع. وتظهر المعلومات عادة على لوحٍ للعرض أو على شاشة حاسوب. وتوضع أجهزة العرض إما على مقربة من المعدّات، أو في غرفة مركزية للعمليّات حيث تخدم المنشأة بأسرها.

٤- أجهزة التحكم

تقسم أجهزة التحكم المستخدمة في مجال هندسة المياه العادمة إلى ثلاث فئات: تحكم رقمي؛ وتحكم نظيري؛ وتحكم آلي. فأجهزة التحكم الرقمي تتخذ واحدة من حالتين (دائر/مُطفأ أو مفتوح/مُغلق أو إنذار/طبيعي)، وتعطي الإشارة التي ترسلها مفاتيح التحويل مؤشّراً عن تغيّر حالة النظام؛ وأنظمة التحكم النظيري تبث البيانات على شكل هامش من القيم وتستخدم لقياس معدل الدفق والتركيز والمستوى؛ وأجهزة التحكم الآلي تصنف باعتبارها أنظمة ذات عمل متقطع يربط حالة المعدّات بقيمة محدّدة أو برنامج أحداث، أو أنظمة ذات عمل مستمر يتطلب إدخال قياس نظيري ويؤدّي إلى تشغيل عنصر تحكم نهائي. ويتكوّن عنصر التحكم من دارات تحكم للتغذية والتغذية الراجعة(٥٤).

٥- أنظمة التقاط البيانات

تتولى أنظمة التقاط البيانات تجميع وعرض البيانات المُرسلة من الحاسّات بفعالية. وتعطي الأنظمة الحديثة من هذا النوع والمعروفة بأنظمة التحكم الرقابي والتقاط البيانات قياسات دقيقة، وتوثيقاً مجرّداً لقياسات العمليّة، وتشغيلاً فعالاً. وتنتج هذه الأجهزة التصحيحات اللازمة للعمليّة، ومنها المحاليل الكيميائية، وإمدادات الهواء، وبرامج تشغيل المضخّات.

وتوضع أنظمة التقاط البيانات في غرفة تحكم مركزي إلى جانب أجهزة تشغيل عناصر التحكم النهائية، بحيث يتطلب تشغيل محطة كبيرة للمعالجة عدداً قليلاً من الموظفين.

٦- الذكاء الاصطناعي

أدّى التطوّر التكنولوجي في مجال الذكاء الاصطناعي إلى استخدام هذه التكنولوجيا في محطات معالجة المياه العادمة، ولا سيّما الأنظمة الخبيرة وأنظمة التحكم المشوّشة والشبكات العصبية(٥٥) (انظر الجدول ١٧).

---

(٥٤) Qasim، مرجع سبق ذكره.
(٥٥) المرجع نفسه.

الجدول ١٧- أنظمة الذكاء الاصطناعي

نظام الذكاء الاصطناعي	وصف النظام
نظام خبير	□ يتضمّن نماذج رياضية تضم مبادϑ ووقائع يستخدمها عمّال التشغيل ذوي الخبرة لاتخاذ القرارات □ يتكوّن من واجهة تبادليّة الفعل تتيح لعمّال التشغيل الحصول على المعلومات اللازمة □ قد يعتبر بدائياً إزاء تعقيد عمليات المعالجة □ قد يختلف الخبراء على القواعد المقترحة
نظام تحكم مشوّش	□ يتكوّن من نظام تفكير يتضمّن نماذج نوعية وكمية للعمليّات وخليطاً من تقنيات التحكم الأوتوماتيكي والأنظمة الخبيرة ○ ويستخدم أنظمة خبيرة للتحكم بعمليات المحطة ○ يعبّر عن طرق الخبراء في التشغيل عبر قواعد من نوع (if-then) □ يجمّع البيانات ويتحكم بالعمليّات بالتغذية الراجعة □ يتيح تحكماً سهلا بالعمليات ويخفف من حمولة العمل واستخدام المواد الكيميائية واستهلاك الطاقة ويحسّن أداء المحطة عموماً
الشبكات العصبية	□ يعطي للحاسوب القدرة على التعلم □ يزوّد بالبيانات الداخلة والنتائج المتوقعة ثمّ يتعلم عبر تعديل معادلات التعرّف الداخلية □ يصبح قادراً بعد تدريبه على حلّ المشاكل عبر مقارنة المداخل لحالة سابقة والبيانات التاريخية للمحطة □ من سيئات هذا النظام إمكانية نقص التحذير إذا وصلت العملية إلى حالة لم تحصل سابقاً

المصادر: - Qasim مرجع سبق ذكره.

- Gilman، مرجع سبق ذكره.

باء- التطبيقات في محطات معالجة المياه العادمة

تحدّد عوامل شتى ضرورة استخدام أجهزة القياس والتحكم في محطات معالجة المياه العادمة، ولا سيّما سعة المحطة، وساعات التشغيل، وتعقيد العمليّات المُستخدمة، ومستوى العمالة، ومتطلبات الوثوقية، بالإضافة إلى الاعتبارات الماليّة. فاتخاذ القرار بشأن استخدام هذه الأجهزة ينبغي أن يكون في مرحلة مبكرة، إذ يؤثر على تصميم المحطة بأسرها. وتساعد أجهزة القياس والتحكم في مراقبة عدد كبير من متغيّرات العمليّات[٥٦].

الجدول ١٨- وصف المتغيّرات المراقبة خلال عمليات المعالجة المختلفة

وحدة المعالجة	جهاز الحس	الغرض	الوصف
مصفاة القضبان	مفتاح كهربائي حدّي	مراقبة مركز البوّابة	عرض ضوء أخضر
	ساعة وقت	تشغيل المشط	عرض ضوء أخضر
	تجاوز عالي المستوى للعوّامة في بئر المعايرة	تشغيل اضطراري للمشط	عرض ضوء أحمر

(٥٦) Gilman، مرجع سبق ذكره.

الجدول ١٨ (تابع)

وحدة المعالجة	جهاز الحس	الغرض	الوصف
محطة الضخ	جهاز صنع الفقاعات في البئر الرطبة	التحكم بمعدل الضخ	عرض مستوى السائل في البئر الرطب
	مفتاح توصيل أو عوّامة	مستوى السائل في بالوعة البئر الجاف	إنذار وقف عمل
	مفاتيح كهربائية حدّية	مراقبة مركز البوّابة	عرض ضوء أخضر
	مفتاح ضغط	مراقبة ضغط الماء على مانع التسرّب لحماية المضخّة	عرض ضوء أحمر
	مفتاح دفق	مراقبة دفق الماء إلى المضخّة لحماية المضخّة	عرض ضوء أحمر
	مبيّن الضغط	مراقبة ضغط الصرف من المضخّة	معيار الضغط
	مراقب المحرّك	مراقبة حالة المحرّك وتعطله	عرض ضوء أخضر أو أحمر في حال التعطل
	محساس مستوى السائل في الحفرة الجافة	التسرّب والطوفان	عرض ضوء أحمر، إنذار وقف عمل
	مراقب الحرارة و/أو التيار الكهربائي	حماية المحرّك من فرط الإحماء والاحتراق	عرض ضوء أحمر
	أخذ العيّنات وتحليلها	محساس للأس الهيدروجيني وكبريتيد الهيدروجين والميثان والأكسجين المذاب. أخذ عيّنة ماء في المختبر	تسجيل مستمرّ على مخطط شريطي. تحليل كيميائي اعتيادي لمجموع المواد الصلبة المعلقة والحاجة الكيميائية الإحيائية للأكسجين ومجموع الكربون العضوي والفوسفور والنتروجين
	قاطع الدارة الأساسي، مفتاح مساعد	مراقبة انقطاع التيار	عرض ضوء أحمر (طاقة بديلة ضرورية)
قياس الدفق	أنبوب فنتوري (Venturi)	مراقبة دفق المياه الداخلة إلى المحطة	عرض، تسجيل وجمع مستمر
حجرة الحصى المهوية	فوّهة ذات مستخلص جذر تربيعي وعرض	قياس تدفّق الهواء لكلّ حجرة	قياس، عرض، تسجيل وجمع الدفق باستمرار
	مبيّن الضغط	مراقبة ضغط الصرف لنافخات الهواء	معيار الضغط
	مراقب المحرّك	مراقبة حالة محرّك النافخة	عرض ضوء أخضر
	مراقب عزم الدوران	مراقبة الناقلة الحلزونية والرافعة بقواديس دوّارة	عرض ضوء أحمر
الترسيب الأولي	كاشف المستوى	التحكم بمضخّات الحمأة والرغوة ومحرّك الهواء في علبة الرغوة	عرض ضوء أخضر
	مبيّن الضغط	مراقبة الصرف من كل مضخة حمأة	عرض ضوء أحمر
	مقياس مغنطيسي للدفق	معدل ضخ الحمأة	عرض، تسجيل وجمع مستمرّ
	مراقب المحرّك	مراقبة حالة كل محرّك	عرض ضوء أخضر
	مراقب عزم الدوران	مراقبة عزم دوران محرّك الية تمشيط الحمأة	إشارة إنذار
المنطقة اللا هوائية	مراقب عزم الدوران	مراقبة عمل محرّك المازج	عرض ضوء أحمر
	منظم السرعة	المراقبة والتحكم بسرعة الدوران لشفرات المازج	عرض سرعة الدوران

الجدول ١٨ (تابع)

وحدة المعالجة	جهاز الحس	الغرض	الوصف
منطقة نقص الأكسجين	مراقب عزم الدوران	مراقبة عمل محرّك المازج	عرض ضوء أحمر
	منظم السرعة	المراقبة والتحكم بسرعة الدوران لشفرات المازج	عرض سرعة الدوران
	مزدوجة حرارية	مراقبة الحرارة والأس الهيدروجيني والأكسجين المذاب والنترات	عرض وتسجيل
	إلكترود أيوني انتقائي		عرض وتسجيل
منطقة هوائية والمروّق النهائي	مقياس الأكسجين المذاب	التحكم بمعدل التهوية	عرض وتسجيل مستمر
	مقياس التدفّق من نوع الضغط الفرقي	مراقبة إمداد الأكسجين لكلّ حوض تهوية	قياس، عرض، تسجيل وجمع الدفق باستمرار
	كاشف فوق السمعي لغطاء الحمأة في المروّق النهائي	مراقبة مستوى الحمأة وتشغيل مضخات الحمأة العائدة	عرض تشغيل المضخة
	مقياس مغنطيسي للدفق	التحكم بدفق الحمأة العائدة	قياس، عرض، تسجيل وجمع الدفق باستمرار
	محلل الجوامد المعلقة	قياس تركيز الجوامد المعلّقة في السائل الممتزج في حوض التهوية وتشغيل مضخات نفايات الحمأة	عرض وتسجيل مجموع الجوامد المعلّقة، تسجيل وجمع الدفق
	مبيّن الضغط	مراقبة ضغط الصرف من المضخّات	معيار الضغط
	مراقب المحرّك	مراقبة حالة كلّ محرّك	
	مراقب عزم الدوران	مراقبة عزم دوران محرّك آلية تمشيط الحمأة ومضخات الحمأة العائدة والنافخات	إشارة إنذار
نظام التطهير بالأشعة فوق البنفسجية	مسيل بارشال (Parshall)	قياس الدفق قبل وحدة التطهير بالأشعة فوق البنفسجية للتحكّم بقوة الضوء	قياس، عرض، تسجيل وجمع الدفق باستمرار
	زجلة طاقة كهربائية	مراقبة الطاقة الكهربائية للمصباح فوق البنفسجي	عرض ضوء أحمر
	مزدوجة حرارية	مراقبة حرارة المصباح فوق البنفسجي	عرض ضوء أحمر
	حالة المصباح	مراقبة المصباح المحروق	عرض ضوء أحمر
	محساس قوة الضوء فوق البنفسجي	قياس قوة الضوء فوق البنفسجي	عرض قوة الضوء وإنذار الجرعة فوق البنفسجية
	حاسب المجموع	جمع الوقت لكلّ مصباح	عرض مجموع ساعات التشغيل
	التحكّم بالمستوى	مراقبة مستوى السائل قبل وبعد مجموعة المصابيح فوق البنفسجية	عرض وتسجيل المستوى. إنذار صوتي للمستويات المنخفضة والمرتفعة
المكثف الثقلي	مقياس مغنطيسي للدفق	قياس دفق الحمأة الداخلة	قياس، عرض، تسجيل وجمع الدفق
	مقياس فنتوري (Venturi)	قياس دفق مياه التخفيف	قياس، عرض، تسجيل وجمع الدفق
	كاشف فوق السمعي لغطاء الحمأة	مراقبة مستوى غطاء الحمأة في المكثف الثقلي	عرض مستوى غطاء الحمأة
	مقياس فوق السمعي للكثافة	مراقبة تركيز الجوامد في الحمأة الداخلة والمكثفة	عرض وتسجيل
	مبيّن الضغط، مراقب المحرّك ومراقب عزم الدوران	مشابهة لتلك في المروّق الأولي والنهائي	مشابهة لتلك في المروّق الأولي والنهائي

الجدول ١٨ (تابع)

وحدة المعالجة	جهاز الحس	الغرض	الوصف
الهضم اللا هوائي	مقياس مغنطيسي للدفق	قياس دفق الحمأة الداخلة	عرض، تسجيل وجمع الدفق
	مقياس فوق السمعي للكثافة	مراقبة تركيز الجوامد في الحمأة الداخلة والمهضومة والمزج	مشابهة لتلك في المكثف الثقلي
	مزدوجة حرارية، إلكترود أيوني انتقائي	مراقبة الحرارة والأس الهيدروجيني والقدرة على خفض الأكسدة لمحتوى الهاضم والحمأة المعاد تمريرها	عرض وتسجيل
	مبيّن المستوى	مراقبة مستوى السائل في الهاضم ومستوى الغطاء العائم	مبيّن
	الضغط والحرارة	التحكم بنظام تسخين المياه	عرض الحرارة وتشغيل المضخة
	مقياس الفوهة	قياس دفق الغاز في الهاضم	عرض، تسجيل وجمع
	مقياس الضغط	ضغط تخزين الغاز	ضوء أحمر وإنذار
	محساس النار	مراقبة النار في المبنى، حالة التوقّد	ضوء أحمر
	كروماتوغراف وكالوريمتر	تحديد تركيبة الغاز والقيمة الحرارية	جدول النتائج وسجلّ البيانات
	مقياس فنتوري (Venturi)	قياس دفق الطفو	تسجيل وجمع
	مفاتيح الضغط والدفق، مبيّن الضغط ومراقب المحرّك	مراقبة المحرّك والمضخّة والضاغط كما هو مبيّن آنفاً	عرض ضوء أحمر
مكبس الترشيح	مبيّن الضغط	قياس الضغط وقوى القص التي تبذلها المرلشح الحزامية	عرض بقرص مدرّج
	سرعة الحزام	التحكم بتوالتر ناقل الحركة لتعديل سرعة الحزام	عرض السرعة
	مقياس مغنطيسي للدفق	مراقبة دفق الحمأة المكيّفة الداخلة إلى كل مكبس ترشيح حزامي	تسجيل وجمع
	مقياس فوق السمعي للكثافة	مراقبة تركيز الجوامد في الحمأة الداخلة	تسجيل وجمع
	مقياس سكوني	قياس وزن كتلة الحمأة	تسجيل البيانات
	مقياس الأوم، فحص المختبر	تحديد مستوى الرطوبة في كتلة الحمأة	تسجيل البيانات
	مبيّن العوّامة والمستوى	قياس مستوى محلول البوليمر في التخزين والتغذية	تسجيل البيانات
	مقياس مغنطيسي للدفق	قياس دفق الكلس ومحلول البوليمر	تسجيل البيانات
	مفاتيح الضغط والدفق، مبيّن الضغط ومراقب المحرّك	مراقبة المحرّك والمضخّة والضاغط كما هو مبيّن آنفاً	عرض كما هو مبيّن أعلاه

المصدر: Qasim، مرجع سبق ذكره.

جيم- الاتجاهات والاهتمامات الجديدة(٥٧)

يؤدّي استخدام معدّات جديدة للقياس أكثر دقّة في السنوات المقبلة إلى إلمام أفضل بخصائص الميـاه العادمة. فأجهزة القياس الحديثة تعطي قيماً بالميكروغرام وحتى النانوغرام في الليتر، بحيث يمكن اكتشـاف الملوّثات الموجودة في المياه العادمة بكمّيات ضئيلة جداً. وذلك يتيح مراقبة مجموعة أكبر مـن المركبـات، وبالتالي الامتثال لقوانين صارمة بشأن صرف المياه العادمة.

(٥٧) Metcalf and Eddy, Inc., *Wastewater engineering*. 4th ed.، مرجع سبق ذكره.

والتوصيف المتطوّر للمياه العادمة سيؤدي بالتالي إلى إلمام أفضل بسلوك مكوّناتها وعلاقتها بأداء عمليّات المعالجة. فاستعمال تقنيات ميكروبيولوجية حديثة، مثلاً، يساعد في تحقيق أداء أمثل لعمليّات المعالجة البيولوجية بحيث يُعزّز تصميم وتشغيل محطات المعالجة.

خامساً- اقتصاديات معالجة المياه العادمة

يعتمد اختيار وتصميم محطات معالجة المياه العادمة على تكـاليف عمليّـات المعالجـة، وضـمنها تكاليف رأس المال المستثمر والتشغيل والصيانة والأرض ومعالجة وتصريف الحمأة والمراقبة. ويتضـمن هذا عرضاً لوسائل تقدير كلفة تكنولوجيات معالجة المياه العادمة المختلفة، وأمثلة عن تقديرات الكلفة حسـب مراجع مختلفة.

ألف- تقدير كلفة معالجة المياه

تبدأ عادة عملية تقييم واختيار التكنولوجيا المناسبة لمعالجة المياه بدراسة للجدوى التقنية تتعلق بطبيعة التطبيق. ويجري تقييم فعالية الكلفة فقط عندما تنتهي عملية تقدير الظروف الحاليـة والمسـتقبلية، وحجـم وخصائص المياه العادمة، وتحديد أنواع العمليات الممكنة ومقارنتها من حيث الفعالية.

ويعتبر أي حل لمعالجة المياه العادمة فعّالاً من حيث الكلفة إذا أدّى إلى خفـض مجمـوع تكـاليف الموارد إلى حدّ أدنى على مدى حياة المنشأة[٥٨]. وتشمل الموارد رأس المال وتكاليف التشـغيل والصـيانة، والتكاليف الاجتماعية والبيئية. وينبغي أن تتضمن الدراسة المنافع التي يمكن أن تنتج من إعـادة اسـتخدام الحمأة والمياه المعالجة.

وتستلزم عملية تقدير كلفة معالجة المياه معرفة عميقة بالعناصر الميكانيكية ذات الصلة وخبرة وكفاءة في اتخاذ القرارات، بسبب صعوبة قياس عدد من المتغيرات. وإذا تقاربت تكـاليف اثنتـين أو أكثـر مـن العمليّات، تصبح حساسية كل عملية تجاه دقّة التقديرات العامل الأساسي في اختيار الحل الأفضل.

الجدول ١٩- معادلات كلفة عمليات المعالجة

العملية	المعادلة	عدد سنوات الخدمة	العناصر
تصفية ونزع الحصى بمصافي القضبان	- تك = ٦٧٤ X ص ٠,٦١١ - س = ٠,٩٦ X ص+ ٢٥ ٠٣٨	٣٠	تضم تكاليف رأس المال قنوات الـدفق، والإنشـاءات العلوية، ومصافي القضـبان الميكانيكيـة، ومطـاحن نفايات التصفية، وغرفـة الحصـى الثقيلـة المـزوّدة بمعدّات ميكانيكية لمعالجة الحصى، ومسيل Parshall ومعدات تسجيل الدفق
تصفية ونزع الحصى دون مصافي القضبان	- تك = ٥٣١ X ص٠,٦١٦ س = ٠,٩٦ X ص + ٢٥ ٠٣٨		

(٥٨) Qasim، مرجع سبق ذكره.

الجدول ١٩ (تابع)

العملية	المعادلة	عدد سنوات الخدمة	العناصر
ترسيب أوّلي مع مضخّات الحمأة	- تك = -٠,٠٠ ٠٠٢ x معدل الدفق^{٢} + ١٩,٢٩ x ص + ٣٨٩ ٢٢٠ - س = ١,٦٩ x ص+ ٣٧٦ ١١ - د = صم x ٣٢,٦ م^{٣}/م^{٢}.يوم/(معدل الفيض السطحي الحقيقي)	٥٠	المصفاة مصمّمة لمعدّل دفق يساوي ٣٢,٦ متر مكعّب لكل متر مربّع في اليوم.
إضافة كلوريد الحديد	- تك = ٠٠٢ ٠,٠٠ x ص^{٢} + ٣,٦ x ص + ٤٤ ٦٢٤ - س = ٩,٦٨ x ص + ٣٩٢ ٢٢ - د = صم x (جرعةFeCL3)/١٠٠مغ/ليتر	٢٠	تضم تل خزّان خرساني للمزج السريع مع خلاط من الفولاذ غير القابل للصدأ، وسائل يحتوي على ٣٥ في المائة FeCl3 وجرعة ١٠٠ مغ/لتر، وتخزين كيميائي لمدة ١٥ يوماً، وكلفة البناء.
معالجة تقليدية بالحمأة المنشّطة مع نشر الهواء	- تك = ٧٢ x ص + ٠٤٣ ٣٦٨ - س = ٤,٥٨ x ص + ٢٩٥ ٣٦	٤٠	تضم تكاليف رأس المال الحوض، ومعدّات وأنابيب التهوية، وبناء النفخ، ولا تضم المروّق ومضخّات الحمأة العائدة. احتياجات الأكسجين هي ١,٢ غرام لكل غرام من الحاجة الكيميائية الإحيائية للأكسجين. مدة التهوية ٦ ساعات.
حمأة منشّطة مع مرحلة واحدة للنترتة	- تك = ٩٠ x ص+ ٧٧٧ ٦١٢ - س = ٩٣ x ص^{٠,٨٣٤}	٤٠	تضم تكاليف رأس المال خزّانات التهوية ذات جريان صمّي وأجهزة التهوية، ولا تضم المروّق ومضخّات الحمأة العائدة. احتياجات الأكسجين هي ١,٥ غرام لكل غرام من الحاجة الكيميائية الإحيائية للأكسجين و٤,٦ غرام لكل غرام من NH3-N المؤكسد.
الترويق النهائي مع حوض تهوية	- تك = ٩٤١ ٢ x ص^{٠,٦٠٩} - س = ٣,٣٢ x ص + ٨٤٢ ٥ - د = صم x ٢٤,٥ م^{٣}/م^{٢}.يوم/(معدل الفيض السطحي الحقيقي)	٤٠	المروّق هو من نوع الملبّد مع معدل فيض لدى التصميم يساوي ٢٤,٥ متر مكعّب لكل متر مربّع في اليوم. تضم تكاليف رأس المال الحمأة العائدة ومضخّات نفايات الحمأة. يمكن استخدام المعادلة للمروّقات ذات مساحة أكبر من ٤٥,٥٦ متر مكعّب وقطر أصغر من ٦١ متراً وللمروّقات المستطيلة ذات مساحة أصغر من ٤٦,٥٦ متر مربّع.
المرشح النضّاض ذو معدل مرتفع	- تك = -٠,٠٠ ٠٠٧ × ص^{٢} + ٥٦,٨٩ × ص + ٢٤٤,٧٩١ - س = ٢٧٨ x ص + ٠,٥٠٥	٥٠	تضم تكاليف رأس المال وحدات الترشيح الدائرية ذات ذراع توزيع دوّارة ووسائط اصطناعية (١,٨ متر) ومصارف سفلية. الحمولة العضوية ٠,٧٢ كيلو غرام لكل متر مكعّب والحمولة الهيدروليكية ٢٨,٣ متر مكعّب لكل متر مربّع في اليوم.

الجدول ١٩ (تابع)

مروّق لمرشح نضاض ذو معدل مرتفع	تك = -٠,٠٠٠٠٥ × ص^{٢} + ٤٤,٧٧ × ص + ٧٠٢ ٣٢٣ - س = -٠,٠٠٠٠٠٣ × ص^{٢} + ٥,٢ × ص + ٧٣٣ ٥ - د = صم x ٣٢,٦م^{٣}/م^{٢}.يوم/معدل الفيض السطحي الحقيقي	٤٠	تضم تكاليف رأس المال مضخّات الحمأة ومضخات إعادة تدوير مياه الصرف وآلية المروق والأنابيب الداخلية. يساوي معدل الفيض لدى التصميم ٣٢,٦٩ متراً مكعباً لكل متر مربّع في اليوم. يمكن استخدام المعادلة للمروّقات ذات المساحة التي تتجاوز ٤٥,٥٦ متراً مكعباً والقطر الذي لا يتجاوز ٦١ متراً وللمروقات المستطيلة ذات المساحة التي لا تتجاوز ٤٦,٥٦ متراً مكعباً.
الترشيح الثقلي (وسائط مزدوجة)	تك = ٢٩٠٣ x ص^{٠,٦٥٦} س = ١٩٤ x ص^{٠,٦٩٣} د = صم x ٩,٨م^{٣}/م^{٢}.يوم/الحمولة الهيدروليكية الحقيقية على المراشح	٣٠	تضمّ تل المنشات لحفظ المستخلص الراجع ومضخّات التغذية والمستخلص الراجع والأنابيب وبناء المرشح ورواق الأنابيب. الحمولة الهيدروليكية لدى التصميم هي ٩,٨ أمتار مكعبة لكلّ متر مربّع في اليوم ونسبة المستخلص الراجع هي ٣٦,٧ متراً مكعباً لكلّ متر مربّع في الساعة.
الامتزاز بالكربون المنشّط	تك = -٠,٠٠٠٢ x ص^{٢} + ١٥٦ x ص+ ٧٩٦,٥٥ س = -٠,٠٠٠٠١ x ص^{٢} + ١٤ x ص+ ٢٢٩٤٥٨	٣٥	تضمّ تكاليف رأس المال أعمدة الكربون ومضخّات التغذية والمستخلص الراجع والأنابيب وبناء العمليّات ومنشآت تجديد الكربون والتخزين. زمن التلامس ٣٠ دقيقة.
الكلورة	تك = ٧٩٥ x ص^{٠,٥٩٨} س = -٠,٠٠٠٠٠١ x ص^{٢} + ٢,٣٦ x ص+ ٢٤٨١٣ د = صم x (جرعة الكلور الحقيقية)/ ١٠مغ/لتر	١٥	تضمّ تكاليف رأس المال بناء الكلور ومنشآت التخزين والمعالجة والمكلورات والحاقنات وغرفة التلامس ذات الجريان الصمّي. جرعة الكلور هي ١٠ مغ لكلّ ليتر وزمن التلامس ٣٠ دقيقة مع دفق وسطيّ.
نزع الكلور باستخدام ثاني أكسيد الكبريت	تك = ١١٧٠ x ص^{٠,٥٩٨} س = -٠,٠٠٠٠٠١ x ص^{٢} + ٠,٩٧ x ص+ ١٥٠٥٨ د = صم x جرعة ثاني أكسيد الكبريت الحقيقية /١ مغ/لتر	٣٠	تضمّ تكاليف رأس المال منشات تخزين ثاني أكسيد الكبريت ونظام التغذية والخلاطات وخزّان التفاعل. جرعة ثاني أكسيد الكبريت هي ١ مغ في اللتر لكلّ مغ في اللتر من بقايا الكلور.
التطهير بالأشعة فوق البنفسجية	- تك = -٠,٠٠٠٠٠٣ x ص^{٢} + ١١,٨٥ x ص+ ٤٣٩ ١٤٢ - س = -٠,٠٠٠٠٠٣ x ص^{٢} + ١,٠٣٨ x ص+ ٥٨٥ ٤	١٥	تضم تكاليف رأس المال أجهزة الأشعة فوق البنفسجية ومصدر وتوزيع الطاقة والمصابيح ومعدّات التنظيف والمراقبة والأنابيب ومعدّات أخرى. تضم تكاليف التشغيل والصيانة الطاقة وإزالة المصابيح وعمّال التنظيف وغيرها.

الجدول ١٩ (تابع)

ضخ الحمأة	- تك = -٠,٠٠٠ ٠٠٥ x ص٢ + ٤٤,٧٧ x ص + ٧٠٢ ٣٢٣ - س = -٠,٠٠٠ ٠٠٣ x ص٢ + ٥,٢x ص+ ٧٣٣ ٥ - د = حمم x (وزن الحمأة الحقيقي/٠,٢٢٧ كغ لكل متر مكعب) x (٤ في المائة/التركيز الحقيقي للجوامد)	١٠	تبنى التكاليف على وزن حمأة يساوي ٠,٢٢٧ كغ لكل متر مكعّب وتركيز ٤ في المائة من الجوامد.
التكثيف الثقلي	- تك = ١٧٧ x ص^{٠,٦٨} - س = -٠,٠٠٠ ٠٠٣ x ص٢ + ٠,١٨x ص + ١٣٦ ٤ - د = حمم x (وزن الجوامد الحقيقي/٠,٠٩٨ كغ لكل متر مكعب) x (٢٩,٣ كغ لكل متر مربّع في اليوم/الحمولة الحقيقية للجوامد)	٥٠	تضم تكاليف رأس المال المكثف وجميع المعدّات الميكانيكية. يجري التكثيف بمعدّل ٠,٠٩٨ كغ لكل متر مكعّب ونسبة حمولة الجوامد تبلغ ٢٩,٣ كغ لكل متر مكعّب في اليوم. لا تضم تكاليف التشغيل والصيانة إضافة البوليمرات أو المعادن.
الهضم الهوائي	- تك = -٠,٠٠٠ ٠٠٢ x ص٢ + ٢٣,٧ x ص+ ٦٢٧ ٢٠٨ - س = ٨,٥٤ x ص^{٠,٩١٦} - د = حمم x (وزن الجوامد الحقيقي/٠,٢٢٧ كغ لكل متر مكعب) x (٢٠ يوماً/مدة الهضم الحقيقية) x (٤ في المائة/التركيز الحقيقي للجوامد)	٤٠	تضم تكاليف رأس المال مدة هضم من ٢٠ يوماً ودفق للحمأة يساوي ٠,٢٢٧ كغ لكل متر مكعّب لـ ٤ في المائة من الجوامد. تؤمّن المهوّيات الميكانيكية احتياجات الأكسجين أي ١,٦ غرام لكل غرام من الـVSS المفكك واحتياجات مزج ٢٦,٣ واط لكل متر مكعّب.
الهاضمات اللا هوائية ذات مرحلتين	- تك = -٠,٠٠٠ ٠٠٢ x ص٢ + ٢١,٢٨x ص+ ٤٨٦ ٤٧١ - س = ٠,٦٧x ص+ ٧٨٤ ٢٦ - د = حمم x (وزن الجوامد الحقيقي/٠,٢٢٧ كغ لكل متر مكعب)	٥٠	تضم تكاليف رأس المال خزّانات الهضم المغطاة والتبادل الحراري ومعدّات مزج الغاز والتجميع وبناء التحكم. يساوي معدّل الحمأة المؤتلفة المكثّفة ٠,٢٢٧ كغ لكل متر مكعّب. تحتوي الحمأة المهضومة على ٠,١٠٨ كغ لكل متر مكعّب من الجوامد لـ ٢,٥ في المائة من الجوامد.
طبقات تجفيف الحمأة	- تك = ٨٩x ص^{٠,٨٥٤} - س = -٠,٠٠٠ ٠٠٢ x ص٢ + ٢,٥٧x ص+ ٠٠٣ ٨ - د = حمم x (وزن الجوامد الحقيقي في الحمأة المهضومة/٠,١٠٨ كغ لكل متر مكعب) x (٩٧,٦ كغ لكل متر مربّع في السنة/الحمولة الحقيقية للجوامد)	٢٠	تضم تكاليف رأس المال طبقات الرمل ومداخل الحمأة والمصارف السفلية ومفتّتات الخلايا وأنابيب الحمأة والعائد من المصارف السفلية وعناصر أخرى. تساوي جوامد الحمأة وحمولة الجوامد على الطبقات ٠,١٠٨ كغ لكل متر مكعّب و٩٧,٦ كغ لكل متر مربّع في السنة.

الجدول ١٩ (تابع)

مكبس الترشيح أو الترشيح الحزامي	- تك = ١٠٢٥٥ x ص^{٠,٤٨١} - س = ٣١٦٥ x ص^{٠,٣٤٨} - د = صم x (وزن الجوامد الحقيقي في الحمأة المهضومة/٠,١٠٨ كغ لكل متر مكعّب)	١٥	تضم تكاليف رأس المال الترشيح ومعدّات النقل ومنشآت التغذية الكيميائية والتخزين وخزّانات التكييف وتخزين الحمأة والمباني. تحتوي الحمأة المهضومة الأولية والثانوية على ٠,١٠٨ كغ لكل متر مكعّب من الجوامد لـ ٢,٥ في المائة من الجوامد. تساوي جرعة المواد الكيميائية المستخدمة للتكييف ٤,٢ غرام من الـ FeCl3 أو ١٠,٨ غرام من الـ CaO لكل متر مكعّب.
الدفن في الأرض	- تك = -٠,٠٠٠٠٥ x ص٢ + ٢,٣٣ x ص+ ٥٧١ ٨٧٢ - س = -٠,٠٠٠٠١ x ص٢ + ١,١١x ص+ ٠٢٦ ٢٥ - د = صم x (وزن الجوامد الحقيقي في الحمأة المنزوحة الماء/٠,١٠٨ كغ لكل متر مكعب) x (٢٠ في المائة/نسبة التركيز الحقيقية للجوامد) x (كمية الحمأة المدفونة في الأرض/مجموع كمية الحمأة المنتجة)	٢٠	تضم تكاليف رأس المال تحضير الموقع والمحلات الأمامية وآبار المراقبة والتسييج وتجميع ومعالجة النضاضة. تضم تكاليف التشغيل والصيانة العمالة والوقود لتشغيل المعدّات. تساوي كمية الجوامد المهضومة ٠,١٠٨ كغ لكل متر مكعّب.
استخدام الجوامد البيولوجية	- تك = - ٠,٠٠٠٠٥ x ص٢ + ٢,٠٤٧ x ص+ ٧٦ ٧٩٠ - س = - ٠,٠٠٠٠١ x ص٢ + ٠,٩٧٨x ص+ ٢٢ ٠٣١ - د = صم x (وزن الجوامد الحقيقي في الحمأة المنزوحة الماء/٠,١٠٨ كغ لكل متر مكعب) x (٢٠ في المائة/نسبة التركيز الحقيقية للجوامد) x (كمية الحمأة المستخدمة كجوامد بيولوجية/مجموع كمية الحمأة المنتجة)	٢٠	تضم تكاليف رأس المال مركبات النقل ومعدّات تحميل وتفريغ الحمأة ومنصّة الخرسانة ومنشأة التخزين. تضم تكاليف التشغيل والصيانة الزيت والغاز والصيانة الوقائية والعمالة والمواد. لا تضمّ كلفة الأرض.
بنى متنوّعة	- تك = ١٤٣ x ص^{٠,٥٦٧} - س = -٠,٠٠٠٠٣ x ص٢ + ١,٩٧ x ص+ ٥٧ ٣٤٩	٥٠	تضم تكاليف رأس المال المكاتب الإدارية والمختبرات والمشاغل والمرآب. تضم تكاليف التشغيل والصيانة الخدمات العامة والصيانة العادية.
موظفي الدعم	- س = ٨,٣١x ص^{٠,٧١٧}	-	تضم عمّال المراقبة والإدارة والكتابة وأعمال المختبر والتكاليف الإدارية.

المصدر: - Qasim، مرجع سبق ذكره.
- United States Environmental Protection Agency, *Detailed costing document for the centralized water treatment industry*.

ملاحظات: تك = تكاليف رأس المال، بالدولار الأميركي.
س = تكاليف التشغيل والصيانة السنوية.
ص = معدل الدفق.
صم = معدل الدفق لدى التصميم.
معدل الدفق المعدل = معدل الدفق المضبوط.

١- مستويات تقدير الكلفة[٥٩]

حسب بعض المراجع، تضم عملية التصميم ثلاثة مستويات لتقديرات الكلفة هي: تقدير الحجم، وتقدير ابتدائي، وتقدير نهائي. وتعرّف مراجع أخرى مستوى رابعاً يُعرف بالمستوى التصوّري، ويقع بين تقدير الحجم والتقدير الابتدائي.

وتعطي البيانات التاريخية لمشاريع سابقة تقديراً جيداً للحجم شرط أن تكون العمليات المستخدمة في المشروعين متشابهة. وتعالج فوارق السعة بالتحليل الصحيح للعوامل. ويُستخدم التقدير التصوّري للكلفة عادة عند تعديل منشأة قائمة، ويُبنى على تعريف أوّلي لنطاق العمل، وضمنه العمليّات وعناصر العمل الأساسية اللازمة.

ويحدّد التقدير الابتدائي الجدوى المالية للمشروع، كما يعطي خط الأساس للكلفة. وفي هذه المرحلة، ينبغي تحديد المنشآت والمعدّات الأساسية بالاستناد إلى مواصفات المصنّع. ويُعتبر التوصّل إلى هذا التقدير عملاً متعدّد الاختصاصات يشارك فيه جميع مهندسي التصميم.

وعندما تجهز وثيقة التصميم، يمكن إعطاء تقدير نهائي لكلفة المشروع. ويُفترض ألا يتجاوز الفارق بين هذا التقدير والتقدير الابتدائي ١٥ في المائة، وإلا يصبح من الضروري تبرير هذا الفارق. ويُستخدم التقدير النهائي للكلفة باعتباره سعر العقد المبرم مع ملتزمي البناء. وفي هذه المرحلة، تؤكد عروض المورّدين بشأن أسعار المعدّات.

٢- الأحداث غير المتوقّعة

يُتوقع حصول أحداث طارئة في كل المشاريع تقريباً. ولذلك يُنصح بزيادة تقدير الكلفة بنسبة معيّنة على سبيل الاحتياط. وكلما زادت دقّة التقدير، قلت نسبة الاحتياط اللازمة. ومع تقدّم عملية التصميم، تزيد عادة الكلفة المعروفة للمشروع بينما تقلّ نسبة الاحتياط بحيث يبقى مجموع كلفة المشروع ثابتاً.

٣- تقدير تكاليف رأس المال

بالإضافة إلى كلفة وحدة المعالجة والمعدات التابعة لها، تضم تكاليف رأس المال تمديدات الأنابيب وآلات القياس والتحكم والمضخّات وتكاليف التركيب والهندسة والتوصيل والاحتياط. وغالباً ما تستخدم البيانات التاريخية لتقدير كلفة رأس المال. ومن المفيد أن تكون هذه البيانات مفصّلة حسب معايير معروفة بحيث تتيح تقدير كلفة أقسام المحطة بتفصيل ودقة.

ولإجراء التقديرات التصوّرية والابتدائية، أو عندما لا تتيسر البيانات التاريخية، يمكن استخدام عوامل لتقدير الكلفة، شرط أن تكون كلفة المعدات الأساسية معروفة. فحسب مرجعين مختلفين[٦٠]، تتراوح تقديرات الكلفة الإجمالية للمشروع، مثلاً، بين ٢٠٠ و٥٢٥ في المائة من كلفة المعدّات.

---

(٥٩) American Water Works Association and American Society of Civil Engineers، *Water treatment plant design*. New York, McGraw-Hill, 1990.

(٦٠) المرجع نفسه.

٤- احتياجات الأرض

تضم احتياجات الأرض المساحة المطلوبة للمعدّات الأساسية والخارجية، ويضاف إليها محيط ٢٠ قدماً حول كل وحدة. وتورد المراجع معادلات خاصة بكل تكنولوجيا من أجل قياس مساحة الأرض المطلوبة[٦١].

٥- إعداد ميزانية التشغيل والصيانة

تضم ميزانية التشغيل السنوية تكاليف التأمين والضرائب واليد العاملة والطاقة والمواد الكيميائية وإدارة المخلفات. وتقدّر وكالة حماية البيئة التابعة للولايات المتحدة الأمريكية تكاليف الصيانة والتشغيل السنوية بـ ٤ في المائة من مجموع كلفة رأس المال[٦٢]. وتتضمن الفقرات التالية معلومات عن عناصر الكلفة الأساسية في ميزانية التشغيل والصيانة.

(أ) ميزانية اليد العاملة

تضم ميزانية اليد العاملة الكلفة الأوّلية للتوظيف، تضاف إليها كلفة دائمة مترتبة على أجر العمّال المعتمدين. وتتأثر هذه الميزانية بعدد الموظّفين المطلوب ومعدل المرتبات، وتعتمد احتياجات اليد العاملة على مستوى الأتمتة وعدد العمليات وسعة المحطة. فالمحطات الكبيرة ذات الأتمتة الكاملة تحتاج إلى عدد قليل من عمال التشغيل.

وعند بدء تشغيل المحطة، تكون كلفة التدريب مرتفعة، ويتوقّع أن تستمرّ هذه الكلفة على المستوى نفسه تقريباً على طول عمر المنشأة بسبب ضرورة اللحاق بتكنولوجيات المعالجة الدائمة التطوّر.

(ب) ميزانية المواد الكيميائية

لتحديد هذه الميزانية، ينبغي تعداد جميع المواد الكيميائية المستخدمة وتقدير الكميات المطلوبة من كل مادة حسب شروط التشغيل، ثم الحصول على عروض أسعار من عدّة مورّدين. ومن الأهمية تنظيم استخدام هذه المواد، وخاصة تلك القصيرة الصلاحية، بحيث يصار إلى تجنب الخسارة.

ومن الأهمية أيضاً تقدير تكاليف المنشآت المطلوبة لحفظ المواد الكيميائية، لأن طريقة الحفظ قد تؤثر على مدّة صلاحية هذه المواد. وتتضم الميزانية أيضاً كلفة التخلص من المواد الفاسدة والنفايات الكيميائية.

(ج) ميزانية الخدمات

تشمل ميزانية الخدمات كلفة الطاقة والغاز والمجاري والهاتف وأهمّها كلفة الطاقة. ولذلك ينبغي دراسة إمكان خفض هذه الكلفة عبر التشغيل خارج الساعات القصوى واستخدام معدّات كهربائية فعّالة من

---

(٦١) المرجع نفسه.

(٦٢) المرجع نفسه.

حيث استهلاكها للطاقة. ولا بد من التنبه إلى أنّ الاستهلاك الفعلي للطاقة غالباً ما يكون أكبر من الاستهلاك المقدر نظريا[٦٣].

(د) ميزانية صيانة المعدّات

غالباً ما ترتفع هذه الميزانية مع عمر المحطة، وتضم تكاليف قطع الغيار واللوازم المستهلكة وأدوات الصيانة. وقد تشكل هذه الميزانية عاملاً هاماً لجدوى المشروع، ولا سيّما إذا ارتفعت كلفة المعدّات كذلك معدّل تبديل القطع[٦٤].

٦- اعتبارات أخرى للكلفة

ينبغي إيلاء أهمية كبرى للظروف الخاصة بالمشروع التي يمكن أن تسبّب زيادةً في التكاليف، لأن آثارها لا تظهر عادة في البيانات التاريخية. ومن أهم هذه الظروف القيود الجغرافية الفنية وقيود الموقع[٦٥]. فبعد موقع المحطة عن مصدر المياه الأساسي، مثلا، يزيد كلفة نقل المياه؛ وعدم مناسبة التربة للبناء يستلزم تدعيماً أكبر لأساس المنشأة.

الجدول ٢٠- تقدير كلفة الوحدة السنوية لمحطات معالجة المياه العادمة بسعات مختلفة (دولار لكل متر مكعب)

العملية	سعة المحطة								
	٢ ٠٠٠ نسمة			١٠ ٠٠٠ نسمة			١٠٠ ٠٠٠ نسمة		
	تكاليف رأس المال	الصيانة والتشغيل	مجموع الكلفة	تكاليف رأس المال	الصيانة والتشغيل	مجموع الكلفة	تكاليف رأس المال	الصيانة والتشغيل	مجموع الكلفة
ميكانيكية	٠,٢٥٠	٠,١٠٨	٠,٣٥٨	٠,١٧٥	٠,٠٨٣	٠,٢٥٨	٠,١١٠	٠,٠٥٠	٠,١٦٠
كيميائية									
حمولة مرتفعة(أ)	٠,٢٥٠	٠,١٦٧	٠,٤١٧	٠,١٧٥	٠,١٢٥	٠,٣٠٠	٠,١١٧	٠,٠٧٥	٠,١٩٢
حمولة منخفضة(ب)	٠,٢٧٥	٠,١٩٢	٠,٤٦٧	٠,٢٠٠	٠,١٤٢	٠,٣٤٢	٠,١٣٣	٠,٠٨٣	٠,٢١٧
بيولوجية									
حمولة مرتفعة(ج)	٠,٣٣٣	٠,١٧٥	٠,٥٠٨	٠,٢٣٣	٠,١٣٣	٠,٣٦٧	٠,١٥٠	٠,٠٨٣	٠,٢٣٣
حمولة منخفضة(د)	٠,٤١٧	٠,١٧٥	٠,٥٩٢	٠,٢٥٨	٠,١٢٥	٠,٣٨٣	٠,١٨٠	٠,٠٨٣	٠,٢٦٣

(٦٣) G. A. Pittner, "The economics of desalination processes", in: *Reverse Osmosis: membrane technology and industrial applications* edited by Z Amjad, New York, Van Nostrand Reinhod, 1993.

(٦٤) المرجع نفسه.

(٦٥) American Water Works Association and American Society of Civil Engineers, *Water treatment plant design*، مرجع سبق ذكره.

الجدول ٢٠ (تابع)

العملية	سعة المحطة								
	٢ ٠٠٠ نسمة			١٠ ٠٠٠ نسمة			١٠ ٠٠٠ نسمة		
	تكاليف رأس المال	الصيانة والتشغيل	مجموع الكلفة	تكاليف رأس المال	الصيانة والتشغيل	مجموع الكلفة	تكاليف رأس المال	الصيانة والتشغيل	مجموع الكلفة
بيولوجية/كيميائية									
ترسيب متزامن(•)	٠,٣٤٢	٠,٢٠٠	٠,٥٤٢	٠,٢٥٠	٠,١٦٧	٠,٤١٧	٠,١٥٠	٠,١٠٨	٠,٢٥٨
ترسيب ابتدائي(و)	٠,٣٨٣	٠,٢٥٠	٠,٦٣٣	٠,٢٧٥	٠,١٧٥	٠,٤٥٠	٠,١٦٧	٠,١٢٥	٠,٢٩٢
بيولوجية/كيميائية/نزع النتروجين									
نزع النتروجين الابتدائي/ترسيب متزامن مبني على الحمأة المنشطة(ز)				٠,٤٣٣	٠,٢٠٠	٠,٦٣٣	٠,٢٨٣	٠,٢٨٣	٠,٢٨٣
نزع النتروجين النهائي/ترسيب متزامن مبني على عملية غشاء بيولوجي(ح)				٠,٣٣٣	٠,٢٢٥	٠,٥٥٨	٠,٢٢٥	٠,٢٢٥	٠,٢٢٥

المصـدر: World Bank. "municipal wastewater treatment in Central and Eastern Europe: present situation and cost effective development strategies". The World Bank Group, Washington, D.C., 1998.

(أ) سعة المحطة ٤٠٠ لتر/نسمة/اليوم.
(ب) معالجة ميكانيكية مطوّرة كيميائياً.
(ج) معالجة كيميائية تقليدية (ترسيب أولي).
(د) حمأة منشّط مع حمولة ٠,٥ kg SS.d/BOD5/Kg.
(•) حمأة منشّط مع حمولة ٠,٢ kg SS.d/BOD5/Kg.
(و) في محطة حمأة منشّطة بحمولة عادية.
(ز) ترسيب تتبعه معالجة في محطة حمأة منشّطة بحمولة عادية.
(ح) مجموع عمر الحمأة ١٣ يوماً.
(ط) مع إضافة مصدر خارجي للكربون.

٧- طرائق التحليل المالي

بعد أن ينتهي تحديد كلفة رأس المال وكلفة التشغيل ومعدّلات الفائدة، يمكن استخدام أي من أسـاليب التحليل المالي التقليدية، ومنها فترة التسديد، ومعدل العائدات الداخلي، وصافي القيمة الحالية(٦٦).

٨- أدوات تقدير كلفة محطات المعالجة

جرى تطوير عدد من الأدوات الحاسوبية التي تساعد المصمّم على تقدير كلفة نظام معالجة الميـاه، وتسهل الحصول على تقديرات ابتدائية فقط، وينبغي استخدامها بحذر لاحتوائهـا علـى عـدد كبيـر مـن الافتراضات المبسّطة. وترتكز تقديرات هذه البرامج عادة على منحنيات الكلفة حسـب بيانـات تاريخيـة. وتتطلب هذه البرامج مدخلات أساسية من المستخدم، ومدخلات تتعلق بمعدلات الدفق ونوعية المياه الداخلـة والخارجة واستراتيجية المعالجة المتبعة.

باء- اقتصاديات أنظمة الأحياء والتبادل الأيوني

(٦٦) Pittner، مرجع سبق ذكره.

تنافس تكنولوجيا الأغشية حالياً تكنولوجيات المعالجة التقليدية بسبب تناقص كلفتها وتحسّن أدائها المستمر. ومع أنه لا يمكن الطعن بأداء تكنولوجيا الأغشية وإمكان تشغيلها على مساحات قليلة من الأرض، وسهولة تشغيلها وصيانتها، يلزم تغيير المعتقدات السائدة وتثبيت جدوى هذه التكنولوجيا عن طريق بيانات الكلفة.

وتتضمن الفقرات التالية تحليلاً لتكاليف التناضح العكسي والترشيح الميكروي والترشيح الفائق الدقّة. والترشيح النانوي، كما تتضمن لمحة عن تكاليف التبادل الأيوني لغرض المقارنة.

١- التكاليف النموذجية للتناضح العكسي

(أ) كلفة المعدّات

تضمّ كلفة معدّات التناضح العكسي عادة العناصر التالية: وحدة الأغشية، ومعدّات التنظيف، والمضخات، والنافخات، ومعدّات التحكم، والخزّانات. وتتناسب كلفة وحدة الأغشية مع سعة المحطة، بينما يمكن تحقيق وفور الحجم في حالة سائر المعدّات. إلا أن هذه الوفور تفقد أهميتها في الأنظمة ذات السعة الكبيرة (أكثر من مليوني غالون في اليوم) لأنّ كلفة وحدة الأغشية تشكل القسط الأكبر من مجمل الكلفة. وأظهر مسح أجري على ٢٥ منشأة حديثة في الولايات المتحدة الأمريكية وكندا، أن كلفة المعدّات تتراوح بين ٠,٤ و٠,٨ دولارات لكل غالون في اليوم(٦٧).

وتؤثر كلفة معدّات المعالجة التمهيدية على طبيعة المياه الداخلة ويبلغ متوسطها نحو ٣٠ في المائة من كلفة وحدة التناضح العكسي. وتتراوح كلفة معدّات الصقل بين ٣٠ و٥٠ في المائة من كلفة وحدة التناضح العكسي، بينما تصل كلفة تركيب النظام بأكمله إلى ٣٠ في المائة تقريباً من كلفة وحدة التناضح العكسي.

وخلال السبعينات والثمانينات، بقيت أسعار وحدات الأغشية ثابتة في أوروبا، بينما تناقصت في الولايات المتحدة الأمريكية(٦٨). ويعزى هذا التناقص إلى تبني عدد من الصناعات في الولايات المتحدة الأمريكية لهذه التكنولوجيا. ففي أواخر الثمانينات، ساهم استخدام صناعة الألبان للوحدات الملفوفة حلزونياً، في خفض سعر هذا النوع من الوحدات ثلاث مرات، أي من ١٤٠٠ دولار لكل متر مربّع من مساحة الغشاء إلى ٣٧٠ دولاراً. ويتراوح السعر الحالي لوحدة مماثلة بين ١٥٠ و٢٥٠ دولاراً لكل متر مربّع من مساحة الغشاء(٦٩). وسيؤدّي هبوط الأسعار إلى توسيع قاعدة الزبائن، مع صعوبة في الحصول على خدمات وتأمينات بسعر منخفض. وتتفاوت أسعار أنظمة الأغشية كثيراً بين بلد وآخر وتتأثر بعدد الوحدات وطريقة صناعتها.

(ب) كلفة بناء المحطة

---

(٦٧) Elarde, J. R. and Bergman, R. A, "The cost of membrane filtration for municipal water supplies", in: *Membrane practices for water treatment*. Edited by S. J Duranceau, American Water Works Association, 2001.

(٦٨) Wagner .J، *Membrane filtration handbook: practical tips and hints*. Osmonics, Inc., 2001.

(٦٩) المرجع نفسه.

تتفاوت تكاليف بناء محطات التناضح العكسي كثيراً بسبب الفروق في معدّات المعالجة التمهيدية والتشكيلة المستخدمة والموقع. ويمكن تحقيق وفورات الحجم حتى سعة خمسة ملايين غالون في اليوم.

(ج) تكاليف التشغيل والصيانة

باستثناء كلفة اليد العاملة، تضم التكاليف الحرجة للتشغيل والصيانة كلفة تبديل الأغشية والمواد الكيميائية والطاقة. وتتناسب هذه التكاليف عادة مع سعة المحطة، ويمكن تحقيق وفورات الحجم حتى سعة خمسة ملايين غالون في اليوم. وتتراوح تكاليف التشغيل والصيانة في المحطات الكبيرة السعة بين ٠,١ و٠,١٥ دولار لكل ألف غالون في اليوم تقريباً[٧٠].

وتتباين كلفة المواد الكيميائية حسب الموقع. وهذه المواد تضم عوامل التخثر، والملح، وعوامل التهيئة الكيميائية، والعوامل المختزلة، والمواد المانعة للتحرشف، وعوامل التشتيت.

وتستهلك عمليّات التناضح العكسي الكثير من الطاقة. فوحدة التناضح العكسي مجهزة بمضخّة ذات فعالية تساوي ٧٨ في المائة، ومحرك ذي فعالية تساوي ٩٣ في المائة، وتحتاج إلى ٤ كيلوواط/ساعة لكل ألف غالون من المياه المعالجة. ويتأثر استهلاك الطاقة بنوعية المياه الداخلة، فمعالجة مياه البحر، مثلا، تستهلك نحو ٢٥ إلى ٣٠ كيلوواط/ساعة لكل ألف غالون، وذلك بسبب الحاجة إلى تشغيل وحدة التناضح العكسي بضغط مرتفع ومعدّل استرجاع منخفض للمياه.

ويمثل تبديل الأغشية نسبة تتراوح بين ٦ و١٠ في المائة من كلفة إنتاج المياه. وكلفة الغشاء تستهلك عادة خلال مدةٍ تتراوح بين ثلاث و خمس سنوات. ويقدّر سعر وحدة من نوع مركب رقيق الغشاء بحجم ٨ × ٤٠ إنش بـ ١٢٠٠ دولار، بينما يقدّر سعر وحدة مماثلة لمعالجة مياه البحر بـ ١٧٠٠ دولار.

وتنظّف الأغشية عموماً كل ستة أشهر، وهذه المدة تتأثر بنوعية المياه الداخلة، فإذا كانت المياه الداخلة جيّدة، يحتمل أن تطول المدة اللازمة لتنظيف الأغشية إلى ثلاث سنوات، وإذا كانت المياه منخفضة الجودة يلزم التنظيف كل شهر واحد. ويبلغ متوسط كلفة المواد الكيميائية اللازمة لتنظيف غشاء واحد نحو ٥٠ دولاراً.

وتشكل كلفة صيانة المعدّات نحو ٢ في المائة من كلفة المعدّات في حالة التناضح العكسي لمياه الأجاج، وقد ترتفع إلى ٤ في المائة من كلفة المعدّات في حالة مياه البحر، وذلك بسبب الصدأ. وتشمل كلفة الصيانة تصليح ومعايرة المعدّات والمضخّات، وتبديل السدّادات والأنابيب.

---

(٧٠) المرجع نفسه.

الإطار ١- اقتصاديات التناضح العكسي لمنشأة طلاء كهربائي

تبحث منشأة طلاء كهربائي في استخدام التناضح العكسي لمعالجة مياه الشطف. وتأمل المنشأة تحقيق فوائد من إعادة استخدام مياه الشطف والمعادن المسترجعة. ويلخص الجدول التالي نتائج الجدوى المالية باستخدام طريقة فترة التسديد، ويبيّن أنّ فترات التسديد تتأثّر بدفق وتركيز مياه التغذية. ويظهر أنّ معالجة مياه شطف النيكل بالتناضح العكسي ممكنة اقتصادياً (فترة تسديد قصيرة) بينما معالجة مياه شطف الكروم غير ممكنة اقتصاديا.

مياه الشطف	الغشاء	تركيز مياه التغذية (مع/ل)	فترة التسديد (بسنوات) حسب الدفق		
			٥ أمتار مكعّبة في الساعة	٥ أمتار مكعّبة في الساعة	١٥ أمتار مكعّبة في الساعة
النيكل	غشاء أنبوبي في أستيتات السليولوز	٢,٣٥	١,٣	٢,١	٧,١
الكادميوم	غشاء حلزوني متعدد الأميد	٥٨٨	٣,٠	٤,٨	٣,٩
الكادميوم	غشاء حلزوني متعدد الأميد	٢٢٣	٥,٩	٩,٤	٨,٠
الكروم	غشاء حلزوني رقيق مركب	١٨٤٠	٧	لا وفور	٩،٩

المصدر: J.J. Schoeman. Et al., "Evaluation of reverse osmosis for electroplating effluent treatment," in*: Water Science and Technology*, Vol 25. No. 10, pp. 79-93, 1992.

٢- تكاليف الترشيح الميكروي والترشيح الفائق الدقّة

أثبت مسح أجري على ٧٤ محطة في العالم في عام ١٩٩٦ الجدوى الاقتصادية لاستخدام الترشيح الميكروي والترشيح الفائق الدقة في المحطات الكبيرة السعة[٧١]. وتراوحت كلفة الوحدة للمعالجة بين ٠,٥ دولارات لكل ١ ٠٠٠ غالون في المحطات ذات السعة التي تتجاوز خمسة ملايين غالون في اليوم و٢,٥ دولارات لكل ١ ٠٠٠ غالون في المحطات ذات السعة التي تساوي عشرة آلاف غالون في اليوم. وتبيّن من المسح أنّ تكاليف نظام أغشية الترشيح الميكروي مقاربة لتكاليف الترشيح الفائق الدقة.

وأظهر المسح أيضاً أنّ تكاليف التشغيل والصيانة في محطات الترشيح الميكروي أقل منها في محطات الترشيح الفائق الدقّة، بسبب انخفاض كلفة تبديل الأغشية في النوع الأوّل من المحطات واستهلاكها كمية أقل من الطاقة[٧٢].

وبالنظر إلى مجموع كلفة المعالجة، يلاحظ أنّ كلفة الوحدة لكل غالون في اليوم باستخدام الترشيح الميكروي أقل من كلفة الترشيح الفائق الدقة، بسبب انخفاض كلفة التشغيل والصيانة لتكنولوجيا الترشيح الميكروي[٧٣].

٣- تكاليف الترشيح النانوي

(٧١) S. Adham, J Jacangelo. and J.M. Lainé, "Characteristics and costs of MF and UF plants", *American Water Works Association Journal*, May 1996.

(٧٢) المرجع نفسه.

(٧٣) المرجع نفسه.

تناولت دراسة[٧٤] أعدّت في عام ١٩٩٨ تأثير تدفق المياه النافذة ومعدل تلوّث الغشاء على تكاليف رأس المال والتشغيل والصيانة لأنظمة الترشيح النانوي بهدف تقييم توازن الكلفة، كما تناولت أثر زيادة السعة على كلفة المحطة، وكذلك أثر عدة أنواع من المعالجة التمهيدية. وتعرض الفقرات التالية نتائج هذه الدراسة.

(أ) الكلفة مقابل ظروف التشغيل[٧٥]

أظهرت حالات زيادة تدفق المياه النافذة وارتفاع معدل الاستعادة انخفاضاً في كلفة دورة حياة الأغشية. فعند زيادة معدل الاستعادة من ٣٠ إلى ٧٥ في المائة، حققت محطة تعمل بسعة ٥٠ مليون غالون في اليوم وتدفق يساوي ١٠ غالونات لكل قدم مربّع انخفاضاً في الكلفة من ٠,٢٧٨ إلى ٠,١٨١ دولار لكل متر مكعّب. وأدّى تثبيت معدل الاستعادة على ٧٥ في المائة ورفع التدفّق من ١٠ إلى ٢٠ غالوناً لكل قدم مربّع في اليوم إلى انخفاض الكلفة من ٠,١٨١ إلى ٠,١٥٢ دولاراً لكل متر مكعّب، بالرغم من ارتفاع وتيرة التنظيف خمس مرّات.

(ب) الكلفة مقابل السعة[٧٦]

يمكن تحقيق وفور الحجم في محطات الترشيح النانوي عند زيادة سعتها حتى خمسة ملايين غالون في اليوم. غير أنّ هذه الوفور تتضاءل نسبياً عندما تتخطى السعة الـ١٥ مليون غالون في اليوم.

(ج) الكلفة مقابل خيارات المعالجة التمهيدية[٧٧]

تناولت الدراسة تأثير مزج عمليّات مختلفة للمعالجة التمهيدية على كلفة النظام، ولا سيّما السيناريوهات التالية: معالجة تمهيدية تقليدية[٧٨] يليها ترشيح نانوي لنصف التدفق المائي؛ معالجة تمهيدية تقليدية تليها معالجة لكامل التدفق المائي باستخدام الترشيح الميكروي أو الترشيح الفائق الدقّة ثمّ يليها ترشيح نانوي لنصف التدفّق المائي؛ معالجة باستخدام الترشيح الميكروي أو الترشيح الفائق الدقّة يليها ترشيح نانوي لـ ٧٥ في المائة من التدفّق المائي.

وتفترض الدراسة أنّ كلفة الترشيح الميكروي متقاربة جداً مع كلفة الترشيح الفائق الدقّة، وتشير إلى أن إضافة المعالجة بالترشيح الميكروي أو الترشيح الفائق الدقّة بعد المعالجة التمهيدية التقليدية ليست فعّالة من حيث الكلفة. وإضافة إلى ذلك، لا فرق يذكر في الكلفة بين الترشيح النانوي لـ ٥٠ أو ٧٥ في المائة من التدفّق المائي.

٤- تكاليف التبادل الأيوني[٧٩]

---

(٧٤) S. Chellam, C. Serra and M. Wiesner, "Estimating costs for integrated membrane systems" *American Water Works Association Journal*, November 1998.

(٧٥) المرجع نفسه.

(٧٦) المرجع نفسه.

(٧٧) المرجع نفسه.

(٧٨) منها التنديف والتخثير والترسيب والترشيح عبر وسط حبيبي.

(٧٩) Pittner، مرجع سبق ذكره.

وتبدي كلفة معدّات التبادل الأيوني فوراق كبيرة تعود للمعيار الذي تبنى الوحـدات علـى أساسـه. فالوحدات الأعلى كلفة تتكون غالباً من أحواض مبطنةً بمطّاط طبيعي، تستوفي شروط الجمعيـة الأمريكيـة لمهندسي الميكانيك، وتكون مؤتمتة تماماً، وتبقى لمدة تتراوح بين ٢٠ و٣٠ سنة.

والأنظمة الأقل كلفة، تتراوح مدّة بقائها بين خمس وعشر سنوات وقد تحتاج إلى تغيير بعض القطـع خلال هذه الفترة، وتتكوّن عادة من أحواض مصنوعة من الزجاج الليفي وصمامات مصنوعة من الكلوريـد المتعدّد الفاينل، وتزوّد بأجهزة تحكم إلكترونية بسيطة. وينبغي التنبه إلى الفروق الكبيرة عند تقـدير كلفـة معدّات التبادل الأيوني.

ومن أجل الحصول على تقدير الحجم، تقول القاعدة بضرب كلفة الراتينج المستخدم بسبعة أضـعاف. وتقدّر كلفة تركيب المعدّات بـ ٣٠ في المائة من كلفتها، بينما يقارب مجموع كلفة المحطة ٢٥٠ في المائـة من كلفة المعدّات.

وتشكل تكاليف الطاقة نحو ٣ إلى ٥ في المائة من مجموع كلفة التشغيل والصيانة. وتستهلك المـواد الكيميائية أعلى نسبة من تكاليف التشغيل والصيانة، أي نحو ٦ إلى ٢٥ في المائة، حسـب نوعيـة الميـاه. وتقدّر تكاليف الصيانة بـ ٢ في المائة من كلفة رأس المال، ولا تشمل كلفة تبديل الشوارد السالبة والموجبـة كل ثلاث إلى خمس سنوات. ويتضمن الإطار ٢ مقارنة لفعالية كلفة التناضح العكسي والتبادل الأيوني.

الإطار ٢- مقارنة فعالية أنظمة التناضح العكسي والتبادل الأيوني

بهدف تحديد التكنولوجيا الأكثر فعالية من حيث الكلفة، أجريت مقارنة بين نظامين، يتضمّن الأول وحدة تناضح عكسي، والثـاني وحـدة تناضح عكسي يليها تبادل أيوني مختلط الطبقات للصقل (نظام مزدوج)، ودُرس النظامان على معدل دفق ٥٠ ثم ٢٠٠ متر مكعّب فـي السـاعة. وتضم تكاليف التشغيل المواد الكيميائية والطاقة والعمالة (١,٥ موظف - السنة لكل نظام) والصيانة وكلفة المياه وتصريف الميـاه العادمـة. ولا تشمل تكاليف الأرض والمباني والضرائب. وتغذي النظامين مياه سطحية معالجة بطريقة ابتدائية بالتلبيد والتصفية والترشيح بالرمل.

ويلخص الجدول التالي نتائج المقارنة. فقد أظهر نظام التبادل الأيوني تأثراً أكبر بمجموع المواد الصلبة المعلقة الموجودة في مياه التغذية من النظام المزدوج. وعندما ترتفع قيمة مجموع المواد الصلبة المعلقة إلى ٣٥٠-٤٠٠ جزء في المليون من $CaCO_3$، يصبح استخدام النظـام المزدوج ممكناً اقتصادياً أكثر من نظام التبادل الأيوني وحده. ويظهر النظام المزدوج تأثراً بكلفة الطاقة ولا يوصى باستخدامه إذا كانت كلفة المياه الخارجة عالية. وأظهر التبادل الأيوني حساسية لكلفة المواد الكيميائية وأظهر النظامان وفوراً في الحجم، لأن كلفة التشغيل والصيانة تمثل القسـط الأكبر.

النظام	الكلفة	٥٠ متراً مكعباً	٢٠٠ متر مكعّب
التبادل الأيوني	كلفة المعالجة	٠,٥-٠,٧ دولارات لكل متر مكعب	٠,٢٥-٠,٤٥ دولاراً لكل متر مكعب
	كلفة التشغيل والصيانة كنسبة من مجموع الكلفة	٧٠ في المائة	٨٠ في المائة
التناضح العكسي يليه التبادل الأيوني	كلفة المعالجة	٠,٦ دولارات لكل متر مكعب	٠,٤ دولاراً لكل كتر مكعب
	كلفة التشغيل والصيانة كنسبة من مجموع الكلفة	٧٢ في المائة	٨٠ في المائة

المصدر: Dow chemical company, Ion exchange or reverse osmosis? http:// www.dow.com/liquidseps/design/ix_ro.htm.

جيم- اقتصاديات النظم الطبيعية لمعالجة المياه

تحقق الأنظمة الطبيعية لمعالجة المياه وفوراً هائلة بالمقارنة مع عمليّات المعالجة التقليدية التي تنـتج مياهاً بنفس النوعية، ولا سيّما في المناطق الريفية حيث تتوفر الأراضي الواسعة بسعر منخفض. وتترتـب على تشغيل هذه الأنظمة تكاليف، ضمنها تكاليف الطاقة بالمقارنة مع طرائق المعالجة الأخرى.

١- تكاليف رأس المال والتشغيل والصيانة

حسب بيانات اتحاد البيئة المائية[٨٠]، تتراوح كلفة رأس المال للأنظمة الطبيعيّة للمعالجة بين ٤٥٠ و ٣ ٠٠٠ دولار لكل متر مكعّب في اليوم، بينما تتراوح كلفة التشغيل والصيانة بين ٠,٠١ و٠,٢ دولار لكل متر مكعّب، وتتميّز عملية التغلغل السريع بأدنى كلفة لرأس المال، وهذه الكلفة لا تشمل سعر الأرض لأنه يتقلب كثيراً بين موقع وآخر.

وتظهر بيانات برنامج الأمم المتحّدة للبيئة[٨١] بوضوح أن أنظمة المعالجة الطبيعية تتميز على الأنظمة الميكانيكية. فكلفة تشغيل هذه الأنظمة وصيانتها تتراوح بين ٣٠ و٢٣٠ دولاراً لكل متر مكعّب في اليوم حسب نوع النظام وسعته، بالمقارنة مع ١٧٠ إلى ٧٧٠ دولاراً للنظام الميكانيكي[٨٢]؛ وكلفة رأس المال لأنظمة المعالجة الطبيعية تتراوح بين ١٥٠ و٢١٩٠ دولاراً لكل متر مكعّب في اليوم، بالمقارنة مع ٨٠٥ إلى ٢٧٧٠ دولاراً للنظام الميكانيكي.

٢- تقدير احتياجات الأرض

يتناسب التقدير الأوّلي لمساحة الأرض المطلوبة من أجل نظام صغير إلى متوسّط الحجم (تدفق يومي أقل من ٢٠ متر مكعّب) مع التدفق اليومي إلى موقع المعالجة، ويتناسب عكسياً مع نفاذية التربة[٨٣]، ويختلف عامل التناسب حسب نظام المعالجة المعتمد.

الجدول ٢١- تقدير معادلات حساب مساحة الأرض اللازمة لنظم مختارة للمعالجة الطبيعية

نظام المعالجة الطبيعية	معادلة حساب مساحة الأرض	الافتراضات
في الموقع	مساحة الأرض (متر مربّع) = ١,٥ X السعة (متر مكعّب في اليوم)/إنفاذية الأرض (متر في اليوم)	التشغيل ممكن على طول السنة وفي جميع المناخات

(٨٠) S. C. Reed et al.، *Natural systems for wastewater treatment*. Manual of practice FD-16. Alrlington, Virginia, Water Environment Federation, 1990.

(٨١) United Nations Environment Programme, Sourcebook of alternative technologies for freshwater Augmentation in Latin America and the Caribbean. http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/techpublications/TechPub-8c/.

(٨٢) تستخدم محطة المعالجة الميكانيكية المشار إليها نظام قناة الأكسدة وتضم كلفة المصفاة وقناة الأكسدة والمضخّات والبناء والمختبر وأحواض تجفيف الحمأة.

(٨٣) Reed et al., *Natural systems for wastewater treatment*، مرجع سبق ذكره.

الجدول ٢١ (تابع)

نظام المعالجة الطبيعية	معادلة حساب مساحة الأرض	الافتراضات
المعدل البطيء	مساحة الأرض (فدّان) = ١٩ x ١٠$^{-٥}$ x السعة (غالون في اليوم)	إمكانية تسليط المياه على الأرض كل السنة في المناخات الحارة
	مساحة الأرض (فدّان) = ٢٨ x ١٠$^{-٥}$ x السعة (غالون في اليوم)	إمكانية تسليط المياه على الأرض نصف السنة في المناخات الباردة
الترشيح السريع	مساحة الأرض (فدّان) = ٦ x ١٠$^{-٥}$ x السعة (غالون في اليوم)	التخزين في الشتاء غير ضروري. إمكانية التشغيل كل السنة
التدفق السطحي	مساحة الأرض (فدّان) = ٩ x ١٠$^{-٥}$ x السعة (غالون في اليوم)	إمكانية تسليط المياه على الأرض كل السنة في المناخات الحارة
	مساحة الأرض (فدّان) = ١٧ x ١٠$^{-٥}$ x السعة (غالون في اليوم)	إمكانية تسليط المياه على الأرض نصف السنة في المناخات الباردة
البركة الاختيارية	مساحة الأرض (هكتار) = ٥,١ x ١٠$^{-٢}$ x السعة (متر مكعّب في اليوم)	المناخ الحار، زمن الاستبقاء الهيدروليكي ٦٠ يوم تقريباً، عمق ١,٥ متر، حمولة عضوية أقلّ من ٦٠ كيلوغراماً لكل هكتار في اليوم
البركة الهوائية	مساحة الأرض (هكتار) = ٣,٢ x ١٠$^{-٢}$ x السعة (متر مكعّب في اليوم)	المناخ الحار، زمن الاستبقاء الهيدروليكي ٣٠ يوماً تقريباً، العمق متر واحد، حمولة عضوية أقل من ٩٠ كيلوغراماً لكل هكتار في اليوم
البركة المهوية مع مزج جزئي	مساحة الأرض (هكتار) = ٢,٩ x ١٠$^{-٢}$ x السعة (متر مكعّب في اليوم)	المناخ البارد، زمن الاستبقاء الهيدروليكي ٥٠ يوماً تقريباً، العمق ٢,٥ متر، حمولة عضوية أقل من ١٠٠ كيلوغرام لكل هكتار في اليوم
بركة الصرف المراقب	مساحة الأرض (هكتار) = ١٦,٣ x ١٠$^{-٢}$ x السعة (متر مكعّب في اليوم)	زمن الاستبقاء الهيدروليكي ١٨٠ يوماً تقريباً، العمق ١,٥ متر
بركة اختيارية ياقوتية للمعالجة الثانوية	مساحة الأرض (هكتار) = ٩,٥ x ١٠$^{-٢}$ x السعة (متر مكعّب في اليوم)	المناخ حار جداً، زمن الاستبقاء الهيدروليكي ٥٠ يوماً تقريباً، العمق ١,٥ متر، حمولة عضوية أقل من ٣٠ كيلوغراماً لكل هكتار في اليوم، حصاد سنوي
بركة ياقوتية للمعالجة الثالثية	مساحة الأرض (هكتار) = ٠,٧١ x ١٠$^{-٢}$ x السعة (متر مكعّب في اليوم)	مياه داخلة ثانوية، زمن الاستبقاء الهيدروليكي ٦ أيام تقريباً، العمق أقل من متر، حمولة عضوية أقل من ٥٠ كيلوغراماً لكل هكتار في اليوم، حرارة المياه أعلى من ١٠ درجات مئوية، حصاد متكرّر أو خضرة
بركة مهوية ياقوتية للمعالجة الثانوية	مساحة الأرض (هكتار) = ١,٥ x ١٠$^{-٢}$ x السعة (متر مكعّب في اليوم)	زمن الاستبقاء الهيدروليكي ٥ أيام تقريباً، العمق متر واحد، المياه الداخلة مترسّبة أو مصفّاة، حمولة عضوية أقل من ٣٠٠ كيلوغرام لكل هكتار في اليوم، حرارة المياه أعلى من ١٠ درجات مئوية، حصاد شهري

الجدول ٢١ (تابع)

نظام المعالجة الطبيعية	معادلة حساب مساحة الأرض	الافتراضات
بركة لصقل مياه الصرف	مساحة الأرض (هكتار) = ٢,٠ x ١٠$^{-٢}$ x السعة (متر مكعّب في اليوم)	زمن الاستبقاء الهيدروليكي ٢٠ يوماً تقريبا، العمق أقل من مترين، حمولة عضوية أقل من ٣٠ كيلوغراماً لكل هكتار في اليوم، حرارة المياه أعلى من ٧ درجات مئوية، المياه الداخلة هي مياه صرف البركة الاختيارية
أرض رطبة ذات مياه سطحية حرة	مساحة الأرض (هكتار) = ٨,٢ x ١٠$^{-٢}$ x السعة (متر مكعّب في اليوم)	زمن الاستبقاء الهيدروليكي ٧ أيام تقريباً، عمق ٠,١ متر، المياه العادمة الداخلة مترسّبة أو مصفاة، حمولة عضوية أقلّ من ١٠٠ كيلوغراماً لكل هكتار في اليوم
أرض رطبة سطحية	مساحة الأرض (هكتار) = ٢,٧ x ١٠$^{-٢}$ x السعة (متر مكعّب في اليوم)	زمن الاستبقاء الهيدروليكي ٧ أيام تقريباً، عمق أقل من ٠,٨ متر، المياه العادمة الداخلة مترسّبة أو مصفاة، حمولة عضوية أقل من ١٥٠ كيلوغراماً لكل هكتار في اليوم

المصدر: S. C. Reed، *Natural systems for wastewater treatment*.

دال- اقتصاديات معالجة مياه الصرف والحمأة

يعتمد مجموع كلفة معالجة مياه الصرف على معدّل دفق المياه الداخلة إلى العمليّات المختلفة داخل منشأة المعالجة. وهذا المعدل، وضمنه حمولة المواد الصلبة والعضوية، يعتبر العامل المحدد لحجم المعدّات وبالتالي لتكاليف رأس المال والتشغيل والصيانة، ويشكل المتغيّر الأساسي في معادلات حساب الكلفة. وتنخفض الكلفة الإجمالية للمحطة مع زيادة السعة بسبب وفور الحجم(٨٤).

وفي معالجة الحمأة، ينبغي أخذ عوامل الكلفة التالية في الاعتبار(٨٥): بناء وتشغيل وصيانة محطة المعالجة(٨٦)؛ نقل الحمأة؛ ضبط نوعية الحمأة؛ تسويق الحمأة المعالجة في حال إعادة الاستخدام؛ التخلص من المنتجات الثانوية النهائية.

وتبلغ كلفة معالجة الحمأة بالتجفيف والحرق ٤٣٥ دولاراً لكل طنّ من المادة الجافة، بينما تتراوح كلفة التسميد والدفن في الأرض بين ١١٠ و٣٢٥ دولاراً. ويؤثر حجم الحمأة المعالجة على كلفة التخزين والنقل.

(٨٤) C. W. Keller et al.، *Financing and charges for wastewater systems*. Water Pollution Control Federation, American Society of Civil Engineers and American Public Works Association, Hyattsville, Maryland, 1984.

(٨٥) International Solid Waste Association, *Sludge treatment and disposal: management approaches and experiences, Environmental Issues Report No.7*. Copenhagen, European Environment Agency, 1997.

(٨٦) تختلف هذه التكاليف كثيراً حسب الظروف المحلية وحجم المحطة.

الجدول ٢٢- تقدير تكاليف رأس المال والتشغيل والصيانة لمحطة حمأة منشطة

مكوّنات ووصف النظام	سنوات الخدمة	كلفة البناء[أ] (مليون دولار)	الكلفة السنوية للصيانة والتشغيل[أ] (ألف دولار)
محطة رافعة	١٥	٥,٣٩٩	١٧٢,٦
معالجة ابتدائية	٣٠	٠,٣٥٦	٦٢,٦
ترسيب أولي (السعة = ٠,٩ x سعة التصميم)[ب]	٥٠	٠,٨٨٢	٧١,٤
نظام لا هوائي – منقوص الأكسجين – هوائي[ج]	٣٠	٤,٠٨٦	٢٧٦,٨
تصفية نهائية (السعة = ١,٩١ x سعة التصميم)	٤٠	٢,٧١٧	٢٤٩,٩
تطهير بالأشعة البنفسجية	١٥	٠,٥٥٧	٤٠,٢
تكثيف ثقلي، حمأة مؤتلفة (السعة = ١,٨٤ x سعة التصميم)	٥٠	٠,٣٥٣	١٥,٥
هضم لا هوائي (السعة = ٠,٩٥ x سعة التصميم)	٥٠	١,٢٢٩	٥١,٥
مرشح حزامي (السعة = ١,٢٢ x سعة التصميم)	١٥	١,٨٢٢	١٣٤,٧
إعادة تدوير الجوامد البيولوجية	٢٠	٠,١٣٠	٤٨,٣
دفن البقايا في الأرض	٢٠	٠,٠١٣	٤,٨٣
مباني إضافية	٥٠	٠,٥٧٥	١٢٩,٤
موظفين مساعدين			١٦,١٦
مجموع فرعي ١: كلفة محطة الحمأة المنشطة		١٨,١١٩	١٢٧٣,٨٩
الأنابيب (٣١% الكهرباء (٨%) أجهزة القياس (٦%) تحضير الموقع (٥%)		٩,٠٥٩	
مجموع فرعي ٢		٢٧,١٧٨	١٢٧٣,٨٩
الهندسة ومراقبة الإنشاء (١٥%) الاحتياط (١٥%)		٨,١٥٣٥	
مجموع فرعي ٣		٣٥,٣٣٢	١٢٧٣,٨٩
مجموع كلفة محطة الحمأة المنشطة		٣٦,٦٠٥	

المصدر: Qasim، مرجع سبق ذكره.

ملاحظات: (أ) احتُسبت تكاليف رأس المال والتشغيل والصيانة باستخدام المعادلات في المراجع S.R. Qasim.
(USEPA. *Industry*. EPA 821-R-98-016. http://www.epa.gov/ostwater/guide/cwt/final/costing.pdf (1998).
ثمّ عدّلت على دولار سنة ١٩٩٨.
(ب) قيمة الدفق المتوسط والذروي حسب التصميم هي ٤٤٠ و١٣٢٠ ليتر في الثانية.
(ج) يفترض أن تكون تكاليف رأس المال والتشغيل والصيانة مرتفعة ٣٠ في المائة عن تكاليف عملية الحمأة المنشطة العادية.

هاء- اقتصاديات استرجاع وإعادة استخدام مياه الصرف والحمأة

١- الاستخدام الزراعي للحمأة الخام

يُعتبر نشر الحمأة الخام فوق الأراضي الزراعية طريقة الصرف الأقل كلفة. ومع ذلك، ينظم القانون بصرامة استخدام الحمأة في الزراعة لجهة احتوائها على معادن ثقيلة، ومواد صلبة جافة، وكائنات ممرضة. ويحدّد القانون أيضاً أنواع التربة والمحاصيل التي يمكن استخدام الحمأة لزراعتها. ولهذا السبب، ولكون استخدام الحمأة في الزراعة موسمياً، يعتبر استخدام الحمأة غير المعالجة في الزراعة صعباً ومكلفاً. ومن عوامل الكلفة التي ينبغي التنبه إليها عند دراسة جدوى إعادة الاستخدام الزراعي للحمأة: سعة

التخزين الكبيرة المطلوبة لتخزين الحمأة لفترات نثر البذور؛ المعدّات الزراعية التي قد تكون غير مناسبة لنشر الحمأة الخام، والتي يجب تغييرها؛ كلفة نقل الحمأة من مساحة التخزين إلى المزارع؛ كلفة التحاليل الدورية للتربة والحمأة من أجل التأكد من مطابقتها للقانون؛ تكاليف الإجراءات الإدارية ومنها الاتفاقات مع المزارعين.

ويتفاوت سعر الطن من الحمأة غير المعالجة المستخدمة في الزراعة كثيراً بين بلد وآخر، ويتراوح بين ٨٠ و٢١٥ دولاراً.

٢- الاستخدام الزراعي للحمأة ومياه الصرف المعالجة

يمكن تفادي مساوئ استخدام الحمأة الخام بمعالجتها قبل تخزينها. وبعد المعالجة تصبح الحمأة أقل حجماً بسبب تضاؤل كمية المياه فيها؛ وأسهل للنشر فوق الأراضي الزراعية باستخدام المعدّات التقليدية بسبب تماسكها المتجانس؛ وذات محتوى مضبوط من المغذيات؛ وأكثر أماناً للاستخدام.

وتزيد المعالجة سعر الحمأة بحيث لا يمكنها منافسة الأسمدة الأخرى، وينبغي مقارنة مختلف تقنيّات معالجة الحمأة لاختيار الطريقة الأقل كلفة والأكثر ملاءمة للبيئة.

ويتضمن الجزء التالي محاولة لمعرفة العوامل الاقتصادية التي تؤثر في استخدام مياه الصرف والحمأة المعالجة في الزراعة من وجهة نظر كل من محطة المعالجة البلديّة والمزارع.

(أ) منظور محطة معالجة المياه العادمة البلدية

من منظور محطة المعالجة، تضيف المعالجة المتقدّمة لصرف المياه العادمة كلفة على كلفة تجميع وتخزين ونقل المياه العادمة إلى الأراضي الزراعية. وتعطي دراسة حول كلفة استخدام مياه الصرف في الأراضي الزراعية في فلوريدا المعلومات التالية[٨٧]. تقارب سعة التخزين اللازمة ٢٥ مليون غالون لكل ١٠ ملايين غالون في اليوم من المياه العادمة الداخلة؛ تبلغ كلفة النقل ٠,٣٥ دولار لكل ١ ٠٠٠ غالون؛ تشمل متطلبات المعالجة الإضافية ترشيح وكلورة المياه المعالجة ثانوياً.

وتتراوح كلفة كل ١ ٠٠٠ غالون من المياه المسترجعة بين ٠,٧ و٠,٩ دولارات، وهي أعلى بكثير من كلفة المياه المستخرجة من بئر المياه الجوفية، التي تتراوح بين ٠,١ و٠,١٥ دولاراً، ولكنها تقارب سعر المياه البلديّة.

وينبغي أخذ المنافع الاقتصادية غير المباشرة في الاعتبار، لأنها تعوّض غالباً عن كلفة المياه المسترجعة. فخفض الطلب على مياه الشرب بسبب استخدام المياه المسترجعة، مثلاً، يحقق توفيراً للكلفة بحد ذاته، وخاصةً إذا كانت البلدية المعنية مضطرّة لتوسيع شبكة مياه الشرب بغرض تلبية تزايد الطلب.

---

(٨٧) National Research Council، *Use of reclaimed water and sludge in food crop production*. Washington, D.C., National Academies Press, 1996.

وفيما يتعلق بإعادة استخدام الحمأة، تشكل مناولة الحمأة نحو نصف كلفة المعالجة في المحطة، وتتراوح كلفة تصنيع الحمأة بين ٢٦٦ و٩٢٥ دولاراً لكل طنّ، حسب العملية المستخدمة.

(ب) منظور المزارع[٨٨]

قد يختار المزارع استخدام المياه والحمأة المعالجة للري والتسميد استناداً إلى العوامل التالية: سعر وتوفر خيارات أخرى لمياه الري والأسمدة؛ سعر المحصول واحتياجاته إلى المغذيات؛ الموسم والحاجة إلى تخزين المياه المسترجعة؛ أنواع التربة الفقيرة بالمغذيات والمواد العضوية؛ كلفة نشر الحمأة على الأراضي الزراعية؛ كلفة المراقبة لضمان تطبيق الأنظمة الخاصة باستخدام الحمأة.

وتقدّر قيمة السماد الموجود في طنّ من الحمأة الجافة بـ١٥ دولاراً، وتتحدّث بعض المراجع عن إمكان تحقيق وفور في الأسمدة وزيادة في الغلة من جراء استخدام الحمأة.

٣- إعادة تغذية المياه الجوفية[٨٩]

تختلف اقتصاديّات تغذية المياه الجوفية كثيراً بين موقع وآخر. وتعتمد الجدوى الاقتصادية على عدد من العوامل التي يمكن تلخيصها بما يلي: الطلب على مصدر إضافي للمياه؛ كلفة الحصول على المياه من مصادر أخرى؛ كلفة معالجة المياه وحقنها.

فمن المتوقّع أن يزيد الطلب على مصادر إضافية للمياه، ولا سيّما في المناطق القاحلة وشبه القاحلة، ومنها البلدان الأعضاء في الإسكوا، كما يُتوقّع تزايد كلفة الحصول على المياه السطحية بسبب تناقص هذه المياه من جهة وارتفاع تكاليف بناء مصادر جديدة للمياه السطحية من جهة أخرى، إضافة إلى الآثار البيئية المضرّة بإمدادات المياه السطحية.

ومعالجة المياه العادمة وحقنها عمليةً مكلفة. ومع ذلك، تعتمد الجدوى المالية لتغذية المياه الجوفية على كلفة المعالجة الإضافية اللازمة للارتقاء بالنوعية إلى مستوى مقبول لغرض النشر أو الحقن. وتضاف إلى ذلك كلفة شراء الأرض المستخدمة للنشر وبناء آبار الحقن ونقل المياه المعالجة إلى أراضي النشر.

ولدى المقارنة مع وسائل أخرى، ينبغي أخذ الفوائد الاقتصادية الأخرى لإعادة تغذية المياه الجوفية في الاعتبار، ومنها إمكان استخراج كميّات أكبر من المياه على عمق أقل، وضمان وجود المياه على مدار السنة.

وتظهر دراسة أعدّها برنامج الأمم المتحدة للبيئة[٩٠] حول كلفة التكنولوجيات البديلة لإعادة تغذية المياه الجوفية في الهند، أنّ آبار الحقن التي تغذي مستودع مياه أرضياً رسوبياً هي الأعلى كلفة، وأن الكلفة

---

(٨٨) المرجع نفسه.

(٨٩) National Research Council, *Ground water recharge using waters of impaired quality*. Washington, D.C., National Academies Press, 1994.

(٩٠) United Nations Environment Programme, *Sourcebook of alternative technologies for freshwater augmentation in some countries in Asia*. http://www.unep.or.jp/ietc/publications/techpublications/techpub-8e/.

تنخفض في حالة آبار الحقن في مناطق الصخور الصلبة لأنّها ضحلة ولا تسدّ بسهولة، وأن أحواض الترشح هي النظام الأقل كلفة، وخاصة إذا كانت الأحواض موجودة سابقاً.

وبوجه عام، تعتبر المياه المعادة تغذيتها اصطناعياً مكلفة، ولذلك يقتصر استخدامها في الري على فترات الشح. وباستطاعة المنافع الاجتماعية-الاقتصادية والبيئية أن تثبت جدوى مشاريع إعادة التغذية الاصطناعية.

الجدول ٢٣- تكاليف إعادة التغذية الاصطناعية المستخدمة في الهند (بالدولار لكل متر مكعب)

بنية إعادة التغذية الاصطناعية	الكلفة الأساسية	كلفة التشغيل
بئر الحقن (منطقة رسوبية)	١٠٠	١٠٠
قناة الانتشار (منطقة رسوبية)	٩	١٠
خزان الترشيح (منطقة رسوبية)	٢	٧
بئر الحقن (منطقة صخور صلبة)	٦	٢١
قناة الانتشار(منطقة صخور صلبة)	٧	٦

المصدر: United Nations Environment Programme, *Sourcebook of alternative technologies for freshwater augmentation in some countries in Asia*. /http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/techpublications/TechPub-8e.

واو- اقتصاديات صرف المياه العادمة

١- صرف المياه العادمة إلى المجاري

بالنسبة إلى الصناعات الصغيرة التي لا يمكنها تحمل تكاليف معالجة المياه العادمة التي تنتجها داخل المنشأة، يعتبر صرف هذه المياه إلى المجاري الحل الوحيد الممكن، ويكون عادة بمقتضى اتفاق مع منشأة المعالجة البلدية ولقاء كلفة محدّدة. وحسب اتحاد الصناعة البريطاني، مثلا، تحدد هذه الكلفة باستخدام معادلة تضم أربعة عناصر هي: الاستقبال والتوصيل، والمعالجة الأوّلية، والمعالجة البيولوجية، ومعالجة الحمأة وصرفها. ويتأثر العنصران الأوّل والثاني بحجم المياه العادمة، بينما يتناسب العنصران الأخيران مع تركيبة المياه العادمة بالمقارنة مع مياه المجاري العادية. وهذه المعادلة تحفز الصناعات على تقليص حجم المياه الخارجة وتحسين نوعيتها. ومن مساوئ هذه المعادلة أنّها تستلزم تحليل المياه باستمرار لتحديد معدّل المواد الصلبة المعلّقة والطلب الكيميائي على الأكسجين. ويمكن استخدام طريقة حساب بديلة وبسيطة تعمل على أساس هذه العوامل (انظر الإطارين ٣ و٤).

الإطار ٣- طرائق احتساب كلفة الصرف إلى المجاري

يصرف مصنع لسكر الشمندر ١٠ ٠٠٠ متر مكعّب من مياه الصرف سنوياً. وتتميّز مياه الصرف بمعدل للطلب الكيميائي على الأكسجين تساوي ١١٥٠ مغ لكل لتر ومعدل مجموع مواد صلبة معلقة يساوي ١٣٠٠ مغ لكل ليتر. وتستخدم محطة المعالجة التي تعالج مياه الصرف المتغيرات التالية:

- كلفة الاستقبال والنقل = ١٦,١ سنت لكل متر مكعّب؛
- كلفة المعالجة الأولية = ٢٥,٢ سنت لكل متر مكعّب؛
- كلفة الحجم الإضافي في حالة المعالجة البيولوجية = ٤,٩ سنت لكل متر مكعّب؛
- كلفة المعالجة البيولوجية = ٢٤,٨ سنت لكل متر مكعّب؛
- كلفة معالجة وصرف الحمأة الأولية = ١١,٨ سنت لكل متر مكعّب؛
- معدل الحاجة الكيميائية للأكسجين لمياه المجاري المترسّبة = ٤٥٦ مغ لكل ليتر؛
- معدل مجموع المواد الصلبة المعلّقة لمياه المجاري المترسّبة = ٣٨٣ مغ لكل ليتر.

تصبح الكلفة لكل متر مكعّب (سنت لكلّ متر مكعّب) = ١٦,١ + ٢٥,٢ + ٤,٩ + (٤٥٦/١١٥٠)٢٤,٨ + (٣٨٣/١٣٠٠) ١١,٨ = ١٤٨,٨. تصبح الكلفة السنوية إذاً ١٠٠٠٠[*] ١,٤٨٨ = ١٤٨٨٠ دولاراً.

المصدر: S. Nesaratnam, Effluent treatment.Leatherhead, Surrey, Pira International,1998.

الإطار ٤- تكنولوجيا صفرية السائل في مصنع للورق

استخدمت التكنولوجيا الصفرية السائل في صناعة الورق. وحسب هذه التكنولوجيا، تعالج مياه الصرف أولاً بوسائل فيزيائية لإزالة المحتوى الليفي. وتعالج المياه لاحقاً بالترشيح الغشائي لخفض محتوى المواد العضوية وغير العضوية المذابة. وفي المرحلة الثالثة، تستخدم طريقة إعادة ضغط البخار ميكانيكياً لتقطير مياه الصرف. وأخيراً، تدخل المياه إلى مرحلة البلورة بالتجميد. وحينئذ يمكن إعادة استخدام المياه المعالجة في صناعة الورق بينما تصرف البقايا الصلبة. ويعطي الجدول التالي تقديرات لكلفة إنشاء وتشغيل نظام مماثل بسعة ٢٠٠٠ متر مكعّب من مياه الصرف يومياً. ومن الواضح أنّ وحدة البلورة بالتجميد هي الأكثر كلفة. وعند دراسة الجدوى الاقتصادية لهذا النظام، ينبغي مقارنة مجموع كلفة النظام مع كلفة استخدام كمية إضافية من المياه الخام وكلفة معالجة وصرف مياه الصرف الإضافية.

طريقة المعالجة	كلفة التشغيل (دولار أمريكي لكل متر مكعّب)	كلفة رأس المال (دولار)
معالجة فيزيائية	٠,١٦	١ ١٢٠ ٠٠٠
معالجة فيزيائية/بيولوجية	٠,٤٠	٤ ٨٠٠ ٠٠٠
معالجة فيزيائية/بيولوجية/أغشية	٠,٨٠	٨ ٠٠٠ ٠٠٠
معالجة فيزيائية/أغشية	٠,٩٦	٤ ٨٠٠ ٠٠٠
إعادة ضغط البخار ميكانيكياً	٢,٤	١٢ ٨٠٠ ٠٠٠
بلورة بالتجميد	٣,٢	١٦ ٠٠٠ ٠٠٠

المصدر: Nesaratnam، مرجع سبق ذكره.

٢- الصرف إلى مياه مضبوطة

تصرف الصناعات المياه العادمة مباشرة في مياه مضبوطة لقاء رسمٍ يُحدّد حسب كميّة ونوعية مياه الصرف. وتستخدم عادة المعادلة التالية لتحديد الرسم المتوجب: الرسم = العامل المالي السنوي (عامل الحجم x عامل المحتوى x عامل المياه المستقبلة).

فالجزء داخل الأقواس يعطي عدد الوحدات، بينما يعطي العامل المالي رسم الوحدة السنوي. وتستخدم الرسوم المدفوعة عادةً لتمويل الجهات المسؤولة عن المياه المستقبلة.

٣- مبادلة الملوّثات

تشكل مبادلة الملوّثات سياسة جديدة نسبياً ترمي إلى تحقيق هدف بيئي بكلفة أقل. ويعـرّف معهـد موارد العالم مبادلة الملوّثات بأنها استراتيجية مرنة، تستطيع من خلالها الجهات حيث كلفة معالجـة الميـاه منخفضة أن تخضع مياه الصرف الخارجة منها لمعالجة تتجاوز تلك المطلوبة قانونياً، فتولد رصيداً تسـتطيع بيعه لجهات أخرى حيث كلفة المعالجة مرتفعة[٩١]. وبمعنى آخر، تتفق جهتان أو أكثر تلوّث نفس المسـاحة فيما بينها على مستوى المعالجة وكمّية الصرف بحيث يمتثل مجموع التأثير البيئي الناجم عن هـذه الجهـات لقانون الصرف. ويمكن تخفيض الكلفة بالاستفادة من وفور الحجم التي تحقق مع زيادة سعة المعالجة. وقد طبقت هذه الطريقة بنجاح في مجالات بيئية أخرى منها تلوّث الهواء، ويضـطلع حاليـاً ببـرامج تجريبيـة للمبادلة في الولايات المتحدة الأمريكية (انظر الإطار ٥).

الإطار ٥- المبادلة للحدّ من الفوسفور

اختيرت ثلاثة أحواض صرف للدراسة، يعاني كل منها من صعوبات في صرف الفوسفور هـي: سـاغينو بـاي (Sagino Bay Watershed) ومينيسوتا (Minnesota Watershed) وروك ريفـر (Rock River Watershed). وهـذه الحالات تختلف من حيث عدد نقاط الصرف والحجم ومستوى المعالجة. وبعد تحليل الظروف المحلية لكل حالة، حُـدّدت الخيارات التالية:

- تحديد أداء كل نقطة صرف، بحيث تضطر لخفض مستوى الفوسفور؛
- برنامج تشجيع تقليدي للحفاظ على ممارسات إدارية جيدة للزراعة؛
- تحديد أداء كل نقطة صرف بطريقة مزدوجة مع المبادلة؛
- برنامج مبادلة مزدوج مع برنامج تشجيع حسب الأداء، أي مزيج من الخيارين الثاني والثالث حيث يعمل جميع الملـوّثين علـى خفض الفوسفور بطريقة متساوية.

ويلخص الجدول التالي تكاليف كل خيار بالمقارنة مع حل نظري ذي كلفة دنيا حيث لا توجد أي قيود. يبيّن الجـدول بوضـوح التـوفير المحقّق عبر استراتيجية مبادلة مرنة بالمقارنة مع البرامج التقليدية. تؤدّي المبادلة إلى نتائج أفضل عندما تضم السياسة مصادر التلوّث الزراعيـة مباشرة.

المنطقة	الخيار الأول	الخيار الثاني	الخيار الثالث	الخيار الرابع	الحل النظري
حوض صرف ساغينو باي	١٩,٥٧	١٦,٢٩	٦,٨٤	٤,٤٥	٤,٣٦
حوض صرف مينيسوتا	٢٣,٨٩	٥,٧٦	٤,٠٤	٢,٩	١,٧٥
حوض صرف روك ريفر	١٠,٣٨	٩,٥٣	٥,٩٥	٣,٨٢	٣,٢٢

المصـدر: P, Faeth, Fertile ground: Nutrient trading's potential to cost-effectively improve water quality. Washington, D. C., World Resources Institute, 2000.

ملاحظة: يختلف خفض مستويات الفوسفور من القاعدة لكل حوض صرف.

(٩١) P. Faeth، *Fertile ground: nutrient tracing's potential to cost-effectively improve water quality*. Washington, D. C., World Resources Institute, 2000.

زاي- النتائج

أصبح عدد كبير من وسائل معالجة المياه ممكناً بفضل التكنولوجيّات الجديدة. وتشكل الكلفة أحياناً العامل المحدد الأوّل، خاصةً في البلدان النامية. ويُعتبر تقدير الكلفة عملية صعبة ومكلفة بحدّ ذاتها، لأن معايير كثيرة تبقى غامضة حتى تقدّم عملية التصميم.

وتساعد البيانات التاريخية في إعطاء تقديرات ابتدائية للكلفة. وعندما تكون البيانات مفصّلة، يمكن استخدامها للتوصل إلى معادلات للكلفة تجسّد تغيّر سعر نظام المعالجة حسب المعايير الأساسية للنظام، ومنها السعة. وتشكل هذه المعادلات أساساً لعدّة برامج حاسوبية معنية بتقدير كلفة معالجة المياه.

وتصبح تقنيّات الأغشية ممكنةً مع تناقص كلفتها، ولا سيّما بالنسبة للأنظمة الكبيرة السعة، بسبب تحقيق وفور الحجم. وينبغي التنبه إلى أنّ أجهزة الأغشية المنخفضة السعر تحتاج عادة إلى صيانة أكثر، وقد تكون غير قابلة للتوسيع والتطوير. ولذلك ينبغي موازنة هذه العوامل حسب متطلبات وعمر النظام.

وللحمأة ومياه الصرف قيمة كبيرة في التسميد الزراعي، تحتم على البلدان الزراعية إعادة استخدام تلك المياه في ري الأراضي الزراعية. غير أنه من الضروري تنظيم برامج إعادة استخدام مياه الصرف وتمويلها وتسويقها بفعالية بحيث يتّسع نطاق قبولها.

وتقدّم أنظمة المعالجة الطبيعية إمكانات كبيرة، ولا سيّما للمناطق الريفية حيث تتوفر مساحات واسعة من الأرض. فأنظمة التغلغل السريع والبحيرات المهواة مثلا يمكن أن تكون أقل كلفة من الأنظمة الميكانيكية لمعالجة المياه ذات الفعالية نفسها. وقد تستفيد دول الإسكوا من بناء أنظمة مماثلة.

ويصبح صرف المياه العادمة في المجاري والمياه المضبوطة مكلفاً عندما تفرض رسوم من الهيئات التنظيمية المسؤولة، بحيث تسعى المنشآت إلى تقليص كمية المياه الخارجة منها وتحسين نوعيتها. وهكذا يمكن أن تدر عملية معالجة المياه العادمة أرباحاً.

وطبقت سياسة مبادلة الملوّثات بنجاح في الولايات المتحدة الأمريكية، وأدّت إلى خفض كبير في مجموع كلفة المعالجة وتحقيق مستويات أعلى من المنافع البيئية.

وتعتبر إعادة تغذية المياه الجوفية طريقة مكلفة يمكن تبريرها بارتفاع كلفة المصادر المائية الأخرى. وقد تكون المنافع البيئية الناتجة من خفض الطلب على المياه السطحية العامل الفاصل في استخدام هذه التقنية.

ونتيجةً لما سبق، تحدّد العوامل الاقتصادية غالباً التكنولوجيا المستخدمة لمعالجة المياه. وينبغي أن يشمل التقييم الاقتصادي لتكنولوجيا معيّنة القضايا التالية: القدرة على تحمّل الكلفة، والكلفة، وفعالية الكلفة، والعمالة، والاستعداد للدفع. فقد يؤدّي التغاضي عن أيّ من هذه القضايا إلى اختيار غير مناسب لتكنولوجيا المعالجة.

وينصح أيضاً عند تقييم التكنولوجيات المختلفة بالنظر إلى معايير أخرى لتقييم الاستدامة بالإضافة إلى المعايير الاقتصادية المذكورة آنفاً، ومنها المعايير البيئية والاجتماعية والثقافية والوظيفيّة.

سادساً- معالجة المياه العادمة في بلدان مختارة أعضاء في الإسكوا

تعتمد معظم البلدان الأعضاء في الإسكوا معالجة وإعادة استخدام المياه العادمة. فكثيراً ما يُعاد استخدام المياه العادمة للريّ، ولا سيّما في المناطق الجافة كما في الدول الأعضاء في مجلس التعاون الخليجي، حيث يُستخدم ما معدّله ٧٠٠ ٠٠٠ متر مكعّب من المياه يومياً في الريّ والصناعة. وتمثل هذه الكمية ٣٥ في المائة من مجموع المياه المعالَجة المنتجة في هذه البلدان[٩٢]. ويصف هذا الفصل ممارسات معالجة وإعادة استخدام المياه العادمة في بلدان مختارة من أعضاء الإسكوا.

ألف- الأردن

منذ عام ١٩٣٠، تجمع، في مدينة السلط في الأردن، المياه العادمة، على نطاق ضيّق باستخدام طرائق بسيطة منها خزّانات تحلل الفضلات وبالوعات المجاري. وغالباً ما تصرف المياه الخارجة من هذه الخزّانات في الحدائق، فتسبّب مشاكل بيئية عدّة منها تلوّث المياه الجوفية. ومع تزايد السكان، أدخلت تكنولوجيات جديدة لجمع ومعالجة المياه العادمة. ويضم الأردن حالياً نحو ٢٠ محطة معالجة، ضمنها اثنتان من المتوقّع وضعهما في الخدمة في المستقبل القريب. وبالإضافة إلى ذلك، بلغت نسبة السكان الموصولين بشبكة المجارير ٥٦ في المائة (أي ٢٥ مليون شخص)، نصفهم من سكان المدن[٩٣].

ويَدخل محطات معالجة المياه العادمة العاملة حالياً في الأردن ٨٢ مليون متر مكعّب في السنة تقريباً. وتعمل ١٣ من هذه المحطات بطرائق تقليدية ميكانيكية، بينما تستخدم ست منها أحواض تثبيت لمخلفات الصرف. وبسبب ارتفاع معدل ملوحة مياه الشرب (مجموع الأجسام الصلبة الذائبة ٥٨٠ جزءاً في المليون) وانخفاض معدّل استهلاك المياه (٧٠ ليتراً لكل فرد في اليوم تقريباً)، تحتوي المياه العادمة الداخلة على نسب مرتفعة من الحمولة العضوية والملوحة، وكذلك على نسبة منخفضة من الملوّثات السامة كالمعادن الثقيلة والمركبات العضوية، لأن ١٠ في المائة فقط من الحمولة البيولوجية تنتج من صرف المخلفات الصناعية[٩٤].

ويجري حالياً تنفيذ عدة خطط لتطوير محطات المعالجة في المستقبل القريب وبناء منشآت جديدة في مناطق أخرى في البلاد، ولا سيّما في الريف. وخلال الأعوام الخمسة إلى العشرة المقبلة، ينوي الأردن بناء ٢٤ محطة معالجة مجموع سعتها ٥٧٥ ٠٠٠ متر مكعّب في اليوم تقريباً.

وغالباً ما يعاد استخدام مياه الصرف المعالَجة الخارجة من المحطات في الريّ، ويصرف الفائض منها في الوديان، حيث تمتزج مع المياه السطحية، كما في خزّان الملك طلال، ثمّ يُعاد استعمالها لاحقاً في الريّ غير المقيّد في وادي الأردن. وفي عام ١٩٩٩، أنتجت محطات معالجة المياه العادمة ٧٢,٣٢ مليون متر مكعّب من المياه، أو ما يعادل ١٣,٨ في المائة من مُجمل المياه المتيسرة للريّ (٥٢١ مليون متر

---

(٩٢) Fluid Knowledge,. Background on water and wastewater industry (2000). http://www.fluid knowledge.com/waterlist/html/waterindustry.html.

(٩٣) F. Bataineh, M. Najjar and S. Malkawi, *Wastewater reuse*, a paper presented at the Water Demand Management Forum, Amman, March 2002. http://www.idrc.ca/waterdemand/ docs/english/jordan.doc.

(٩٤) المرجع نفسه.

مكعّب). ومن المتوقع أن تصل، في عام ٢٠٢٠، كمية مياه الصرف المعالجة إلى ٢٦٥,٣ مليون متر مكعّب، مشكلةً نحو ٢٥ في المائة من مجمل المياه المتوفرة للريّ[٩٥].

باء- الكويت

بحسب إحصاءات منظمة الأمم المتحدة للأغذية والزراعة لعام ١٩٩٤، تنتج الكويت ١١٩ مليون متر مكعّب من المياه العادمة في السنة، وتعالج ١٠٣ ملايين متر مكعّب منها، وتعيد استخدام ٥٢ مليون متر مكعّب من المياه المعالجة في الري الزراعي، وتصرف الباقي في البحر[٩٦]. ومنذ عام ١٩٨٧، تعمل أربع محطات لمعالجة مياه المجارير في الكويت، هي محطات العارضية والرقة والجهراء والفيلكا بسعة ٤٠٠ ٠٠٠ متر مكعّب في اليوم تقريباً.

وفي أواخر عام ١٩٩٧، بدأت وزارة الأشغال العامة في الكويت بإعداد خطّة توجيهية تغطي الفترة الممتدة حتى عام ٢٠٢٠، وتستهدف استخدام تحقيق الفعالية في استخدام المياه المعالجة. وللموقعين الغربي والشمالي (المياه الخارجة من محطتي الجهراء والعارضية)، اقترح أن تعطى الأهمية أولاً لتطوير نظام متكامل لإنتاج الخضار؛ وثانياً لتنمية إنتاج العلف والتبن الطازج بالمداورة مع الخضار في المواقع الزراعية الأخرى. وبعد تحقيق هذين الهدفين، تُزرع الغابات ضماناً لحماية بيئية أساسية ودائمة[٩٧].

جيم- لبنان

يُنتج لبنان نحو ٢٤٩ مليون متر مكعّب من المياه العادمة سنوياً، بحمولة طاب بيولوجي كيميائي على الأكسجين تساوي ٩٦٠ ٩٩ طناً. وتشير إحصاءات المباني والمؤسسات التي أعدّتها الإدارة المركزية للإحصاء في التسعينات، أن نحو ٣٧ في المائة من مجموع الأبنية في لبنان، المقدّر بنصف مليون بناء، موصولة بشبكة الصرف الصحي، والنسبة المتبقية، والبالغة ٦٢ في المائة، تستخدم خزّانات لتحلل الفضلات وبالوعات المجاري، أو تصرف المياه العادمة مباشرة في البيئة المحيطة. وفي أواخر التسعينات، أنجزت أعمال واسعة لشبكة المياه العادمة، ساهمت في تحسين سعة جمع تلك المياه[٩٨].

وفي لبنان حالياً ٣٥ محطة لمعالجة المياه العادمة قيد التخطيط أو الإنشاء (سبع منها قيد الإنشاء، و١٨ قيد التحضير وقد جرى تمويلها، وسبع أخرى لم يجر تمويلها بعد). والمحطة الوحيدة العاملة حالياً على نطاق واسع، هي محطة الغدير الواقعة جنوب مدينة بيروت، وهي تؤمّن المعالجة الأولية فقط (أي

---

(٩٥) المرجع نفسه.

(٩٦) Food and Agriculture Organization *Irrigation in the Near East Region in Figures*. Rome, United Nations, 1997. http://www.fao.org/docrep/W4356E/w4356e0g.htm .

(٩٧) Food and Agriculture Organization *Wastewater treatment and use in agriculture*, FAO Irrigation and Drainage Paper 47, Rome, United Nations, 1992. http://www.fao.org/docrep/T0551E/t0551e0b.htm#9.5 wastewater treatment and human exposure control: kuwait.

(٩٨) Ministry of Environment *State of the environment report 2001*. Beirut, Government of Lebanono, 2001. http://www.moe.gov.lb/ledo/soer2001pdf/chpt15_wwm.pdf .

نزع الحبيبات المعلقة والرغوة). وتجرى دراسة حالياً على الجدوى الاقتصادية لتطوير محطة الغدير بحيث تؤمن المعالجة الثانوية قبل صرف المياه العادمة إلى البحر(٩٩).

وفي غياب المحطات العاملة لمعالجة المياه العادمة، تصرف مياه المجارير من المدن الساحلية في البحر بينما تصرف المياه العادمة الناتجة من المجتمعات الداخلية في الأنهار ومجاري المياه والأنهار الجافة والأراضي المفتوحة أو في جوف الأرض عبر آبار جافة. فعلى طول الساحل ٥٣ مخرجاً للتصريف تقريباً، معظمها يمتدّ بضعة أمتار فقط في البحر، أو ينتهي على سطح المياه (أي أن مخرج التصريف ليس مغموراً بالمياه، وبالتالي، لا تخفف المياه العادمة بفعالية). ويتميّز مخرج تصريف محطة الغدير بقطر دائري يعادل ١,٢ متر، وهو مغمور بالمياه ويمتدّ مسافة ٢٦ كيلومتراً في البحر الأبيض المتوسّط. ونقطة المخرج موجودة على عمق ٦٠ متراً تحت سطح المياه، بحيث تُخفف المياه العادمة.

وحثّ تأخير أعمال الصرف في عدّة مناطق من البلاد البلديات والمجتمعات المحلية على اللجوء إلى ترتيبات خاصة، بدعم فنّي ومادّي من منظمات غير حكومية تؤمّن التمويل من ممولين دوليين، منهم وكالة التنمية الدولية التابعة للولايات المتحدة الأمريكية. وبهذه الطريقة، بلغ، في عام ٢٠٠١، عدد محطات المعالجة ١٣ محطة، تعمل على مستوى المجتمعات الصغيرة، ومعظمها يؤمن المعالجة الثانوية، ويُنتج مياه صالحة للريّ(١٠٠).

دال- مصر

تواجه شبكات الصرف في مصر عدة مشاكل تشغيلية، ناجمة عن حجم الشبكة التي أخفقت في استيعاب المياه العادمة التي ينتجها عدد متزايد من السكان. وبالإضافة إلى ذلك، تبقى معظم المياه العادمة المجمّعة من غير معالجة، أو تلقى معالجة غير فعّالة، بسبب قصور محطات المعالجة العاملة حالياً. وهكذا يبقى ٢٥ في المائة من السكان غير موصولين بشبكة الصرف الصحي، وتقتصر المعالجة الوافية على ١٥ في المائة فقط من المياه العادمة المجمّعة، وتلقى نسبة ٢٥ في المائة من المياه المتبقية معالجة جزئية و٦٠ في المائة تصرف عبر قنوات مفتوحة في البحر الأبيض المتوسط(١٠١).

وتشهد القاهرة تزايداً سريعاً ومستمراً في عدد السكان، يرافقه توسّع كبير في المساحة. وشبكة الصرف، التي أنشئت في مطلع القرن العشرين، أصبحت في الثمانينات منه عاجزة عن استيعاب الضغط الذي يفرضه تزايد عدد السكان. وبالإضافة إلى ذلك، تأثرت الشبكة تكراراً بالفيض الناجم عن أضرار في التمديدات والحمولة الكبيرة. وفي منتصف العقد الماضي، كانت ست محطات معالجة على الأقل تخدم منطقة القاهرة الكبرى، ثلاث منها تصرف المياه المعالجة عبر مصارف زراعية إلى البحيرات الشمالية والبحر الأبيض المتوسّط، ومحطة تصرف المياه المعالجة في النيل، بينما يعاد استخدام المياه الخارجة من محطتين لري الصحراء واستصلاح الأراضي (أي تطوير الصحراء). ومن أجل حلّ هذه المشكلة الصحّية، أطلقت الحكومة المصرية برنامجاً لتوسيع شبكة الصرف(١٠٢)، تحت اسم مشروع القاهرة الكبرى للمياه العادمة.

---

(٩٩) المرجع نفسه.

(١٠٠) المرجع نفسه.

(١٠١) S. Myllyl?,. *Cairo - A mega-city and its water resources, a paper presented at* the Third Nordic Conference on Middle Eastern Studies: Ethnic encounter and culture change. Joensuu, Finland, 19-22, June 1995. http://www.hf.uib.no/smi/paj/myllyla.html#fn7 .

(١٠٢) كان من المخطط أن يؤمّن مشروع إعادة تأهيل وتوسيع شبكة الصرف ريّ ٠٠٠ ٨٤ هكتار.

ويستهدف هذا المشروع تأمين شبكة صرف للقاهرة تكـون كافيـة لتلبيـة احتياجـات المدينـة المتزايـدة. والمحطة الأساسية في هذا المشروع هي محطة جبل الأصفر للمعالجة، التي تعمل بسعة ثلاثة ملايـين متـر مكعّب في اليوم وتخدم ثلاثة ملايين شخص(١٠٣).

وتتضمّن جميع مشاريع الصرف في المدن منشآت للمعالجة حتى المستوى الثالث بحيث تتيح إعـادة استعمال المياه المعالجة للريّ. ففي القاهرة، مثلاً، تبلغ سعة محطات المعالجة أربعة ملايـين متـر مكعّـب يومياً، وستؤمّن المياه المعالجة لريّ ١٦٨ ٠٠٠ هكتار من الأراضي الصحراوية. والجدير بالذكر أن عـددا كبيرا من المناطق الريفية لا يتمتع بمنشآت مماثلة(١٠٤).

هاء- اليمن

دعت الاستراتيجيات والسياسات والقوانين المتعلقة بالمياه في اليمن مؤخراً إلى اعتبار المياه العادمـة المعالجة مورداً للمياه واستعمالها بطريقة آمنة. وفي عام ٢٠٠١، وُضعت مسودة لمخطـط يتعلّـق بإعـادة استخدام المياه العادمة. وتدعم هذه المسودة تنفيذ عدة أنشطة لإدارة المياه العادمـة علـى شـكل مشـاريع وبرامج.

وتعمل حالياً تسع محطات لمعالجة المياه العادمة، مُنتجةً نحو ٩٢ ٠٠٠ متـر مكعّـب مـن الميـاه المعالجة يومياً، أو ما يعادل ٣٣٥ مليون متر مكعّب في السنة، بالإضافة إلى ست محطات أخرى من المتوقع أن يكون بعضها قد دخل الخدمة وبعضها الآخر في طور الإنجاز(١٠٥).

وتصرف المياه العادمة في البحر أو يُعاد استخدامها في الزراعة لأغـراض الـريّ المقيّـد وغيـر المقيّد. وتمارس وزارة الزراعة والريّ اليمنية الريّ المقيّد لإنشاء حزام أخضر وتثبيت تلال الرمل وضـبط التصحّر على طول السهول الساحلية. وغالباً ما يمارس المزارعون في المرتفعات والوديـان الـريّ غيـر المقيّد لزراعة الذرة والعلف في بعض المناطق (منطقة تعز) وبعض المزروعات الأخرى كالخضار والفواكه (منطقة صنعاء). ويستعمل المزارعون هذه المياه دون الحصول على أيّ تدريب أو خدمات إرشاد(١٠٦).

وتختلف نوعية المياه المعالجة في اليمن بين منطقة وأخرى حسب طريقة المعالجة المستخدمة، وسعة المحطة وظروف التشغيل. وقد أثارت نوعية هذه المياه القابلة للجدل مشاكل عدة، وخاصـة بالنسـبة إلـى المزارعين الذين هم مستخدموها الأساسيون. ومن هذه المشاكل: انبعاث الروائح ووجود الحشرات؛ ظهـور الأمراض الجلدية بين المزارعين؛ مشاكل ملوحة التربة؛ ظهور الأمراض في المحاصـيل المرويّـة بميـاه معالجة؛ ظهور الأمراض لدى الحيوانات بسبب احتكاكها المباشر بالمياه المعالجة.

---

(١٠٣) Black and Veatch. *Gabal Al Asfar Treatment Plant.* http://www.bbv-ltd.com/Projects /WSTD/ GlobslEIATP.htm.

(١٠٤) Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes (CIHEAM), *Annual Report 2000: Development and Agri-food Policies in the Mediterranean Region*. Paris, CIHEAM, 2000. http://www.ciheam.org/ressources/en/rapport2000/chapter8.pdf.

(١٠٥) Q.Y. Abdul-Malik *Yemen's water resources and treated wastewater. Sana'a,* Ministry of Agriculture and Irrigation of Yemen. n.d. http://www.idrc.ca/waterdemand/docs/english/yemen-english.doc.

(١٠٦) المرجع نفسه.

سابعاً- الخلاصة والتوصيات

تحتلّ المعالجة الفعّالة للمياه العادمة أهميةً كبيرة بالنسبة للبيئة والصحة العامة. وقد أدّت أنشطة البحث الواسعة في هذا المجال إلى تطوير وتنويع وسائل وأساليب معالجة المياه العادمة وإدارة الحمأة. وتضمّنت هذه الدراسة وصفاً لعدد من التكنولوجيات المستعملة غالباً في معالجة المياه العادمة والمعادلات المعتمدة في تقدير الكلفة. وتبع هذا الوصف عَرْض موجز لتطبيقات الأجهزة الدقيقة والضبط في تشغيل ومراقبة عمليات المعالجة في المحطات. وناقشت الدراسة أيضاً وضع معالجة وإعادة استخدام المياه العادمة في بلدان مختارة من أعضاء الإسكوا. ومن الواضح أنّه يجب تحويل الجهود المبذولة في منطقة الإسكوا نحو تطوير إعادة استخدام المياه العادمة وإنشاء شبكات للمعلومات الغاية منها نقل التكنولوجيا والخبرة اللازمتين.

ومؤخّراً، أعطيت إعادة استخدام المياه العادمة أهميةً متزايدة، باعتبارها وحدة أساسية في إدارة الطلب على المياه. وبينما يمارس عدد من دول الإسكوا إعادة استخدام المياه المعالجة في الزراعة، على الحكومات أن تتعامل مع إعادة استخدام المياه العادمة باعتبارها جزءاً من استراتيجية متكاملة لإدارة المياه، على مستوى الحوض، مع تنسيق متعدّد التخصّصات بين مختلف القطاعات، ومنها البيئة والصحة والصناعة والزراعة والشؤون البلدية. وفي هذا السياق، غالباً ما ترتبط مخاطر الصحة العامة بإعادة استخدام المياه العادمة. ولذلك من الأهمية بمكان نشر المعلومات حول مخاطر إعادة استخدام المياه العادمة غير المعالجة ووضع أسس حول الاستخدام الآمن، والأهمّ انّه على الحكومات ضبط نوعية المياه الخارجة من محطات المعالجة، وأساليب إعادة الاستخدام، والصحة العامة، ونوعية المياه المستخدمة للمحاصيل، ونوعية التربة والمياه الجوفية.

وبغية تعزيز التطور في أساليب معالجة وإعادة استخدام المياه العادمة المتبعة حالياً في الدول الأعضاء في الإسكوا، ينبغي إنشاء شبكة معلومات تيسر تبادل المعلومات حول البحوث التطبيقية في مجال إدارة المياه العادمة والأساليب المناسبة لإعادة استخدامها. وينبغي أن تتحلى هذه الشبكة بمنظور شامل وأن تتناول كافة أوجه إدارة المياه العادمة، وضمنها التكنولوجيات المناسبة والمعقولة الكلفة لجمع ومعالجة وصرف المياه، بالإضافة إلى قضايا التنظيم والضبط الأساسية لإدارة المياه العادمة. وينبغي أن تكون هذه الشبكة أيضاً قادرة على تنفيذ عدة أنشطة، منها تلخيص ونشر معلومات وبحوث حول هذا المجال؛ وحفظ معلومات حديثة حول أنشطة البحث والدراسات والمشاريع التي يضطلع بها أعضاء الشبكة؛ وتقديم معلومات حول برامج التدريب المتاحة في هذا المجال؛ والتجاوب مع طلب المعلومات من أعضاء الشبكة؛ وتنظيم منتديات على الخط للنقاش بين أعضاء الشبكة؛ وحفظ وتوسيع المعلومات حول إدارة المياه العادمة.

وينبغي توجيه بعض الجهود نحو توفير البيانات حول تكاليف معالجة المياه العادمة في منطقة الإسكوا. ويمكن الحصول على هذه البيانات بإجراء مسح ميداني لمنشآت معالجة المياه العادمة العاملة في بلدان مختارة، لا سيّما وان تكاليف المعالجة الفعلية تتأثّر كثيراً بخصائص الموقع وظروف البلد. ومن الممكن الحصول على تقديرات تكاليف المعالجة باستخدام تكنولوجيات متقدمة (كالتناضح العكسي والترشيح الميكروي والترشيح الفائق وغيرها)، وذلك عن طريق المنشآت الصناعية في أوروبا والولايات المتحدة الأمريكية، لأنّ هذه التكنولوجيات نادرة الاستخدام في محطات المعالجة البلديّة في بلدان الإسكوا.

المراجع

Abdul-Malik, Q. Y .*Yemen's water resources and treated wastewater.* Sana'a, Ministry of Agriculture and Irrigation of Yemen. n.d. http://www.idrc.ca/waterdemand/docs/english/yemen-english.doc.

Adham, S., J. Jacangelo and J.M. Lainé, "Characteristics and costs of MF and UF plants", *American Water Works Association Journal*, May 1996.

American Water Works Association and American Society of Civil Engineers ،*Water treatment plant design*. New York, McGraw-Hill, 1990.

Balkema, A .*Sustainability criteria for the comparison of wastewater treatment technologies*. Paper prepared for the Eleventh European Junior Scientist Meeting, "The Myth of Cycles versus Sustainable Water and Material Flux Management", Wildpark Eekholt, Germany, 12-15 February 1998.

Bataineh, F., M. Najjar and S. Malkawi ،*Wastewater reuse*. Paper presented at the Water Demand Management Forum. Amman, March 2000.
http://www.idrc.ca/waterdemand/ docs/english/jordan.doc.

Black and Veatch .*Gabal Al Asfar Treatment Plant .*
http://www.bbv-ltd.com/Projects /WSTD/ GlobslEIATP.htm.

Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes (CIHEAM), *Annual report 2000: development and agri-food policies in the Mediterranean Region*. Paris, CIHEAM, 2000. http://www.ciheam.org/ressources/en/rapport2000/chapter8.pdf.

Chellam, S., C. Serra and M. Wiesner, "Estimating costs for integrated membrane systems ،"*Water Works American Association Journal*, November 1998.

Dow Chemical Company ،*Ion exchange or reverse osmosis* ﺑ
http://www.dow.com/liquidseps/design/ix_ro.htm.

Droste, R.L .*Theory and practice of water and wastewater treatment*. New York, John Wiley and Sons, Inc., 1996.

Elarde, J. R. and R.A. Bergman, "The cost of membrane filtration for municipal water supplies", Chapter I in: *Membrane practices for water treatment*. Edited by S. J. Duranceau. Donver, American Water Works Association, 2001.

Faeth, P ،.*Fertile ground: nutrient trading's potential to cost-effectively improve water quality*. Washington, D. C., World Resources Institute, 2000.

Fluid Knowledge ،*Background on water and wastewater Industry*. (2000).
http://www.fluid knowledge.com/waterlist/html/waterindustry.html.

Food and Agriculture Organization, *Wastewater treatment and use in Agriculture*.
FAO Irrigation and Drainage Paper 47. Rome, United Nations, 1992. http://www.fao.org/docrep/T0551E/t0551e0b.htm#9.5 wastewater treatment and human exposure control: kuwait.

،_____*Irrigation in the Near East Region in Figures*. Rome, United Nations, 1997.
http://www.fao.org/docrep/W4356E/w4356e0g.htm

Garrett, T.M. Jr"،.Instrumentation, control and automation progress in the United States in the Last 24 Years". *Water Science and Technology*, 37, 1998, pp. 21-25.

Gilman, H. D. et al ،.*Instrumentation in wastewater treatment facilities: manual of Practice* ،No. 21. Arlington, Virginia, Water Environment Federation, 1993.

International Solid Waste Association, *Sludge treatment and disposal: management approaches and experiences*. Environmental Issues Series no.7. Copenhagen, European Environment Agency, 1997.

Keller, C. W et al ،.*Financing and charges for wastewater systems*. Water Pollution Control Federation, American Society of Civil Engineers and American Public Works Association, Hyattsville, Maryland, 1984.

Liu, D.H.F. and B.G. Liptak ،*Wastewater treatment*. Boca Raton, Florida, Lewis, 1999.

McGhee, T.J ،.*Water Supply and Sewerage*. New York, McGraw Hill, 1972.

Metcalf and Eddy, Inc ..*Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse*. New York, McGraw Hill., 1991.

____, *Wastewater engineering: treatment and reuse* .New York, McGraw Hill, 2002.

Ministry of Environment of Lebanon, *Lebanon State of the environment report 2001*. Beirut, Government of Lebanon, 2001. http://www.moe.gov.lb/ledo/soer2001pdf/chpt15_wwm.pdf.

Ministry of Public Works of Kuwait ،*The Kuwait sanitary scheme*. Sanitary Engineering Department, Kuwait, 1996.

Myllylä, S., *Cairo - a mega-city and Its water resources.* Paper presented at the Third Nordic Conference on Middle Eastern Studies: ethnic encounter and culture change. Joensuu, Finland, 19-22, June 1995. http://www.hf.uib.no/smi/paj/myllyla.html#fn7.

National Research Council, Ground water recharge using Waters of impaired quality. Washington, D.C., National Academies Press, 1994.

____, *Use of reclaimed water and sludge in food crop production*. Washington, D.C., National Academies Press, 1996.

Nesaratnam, S .*Effluent treatment*. Leatherhead, Surrey, Pira International, 1998.

Pittner, G. A., "The Economics of desalination processes", in :*Reverse osmosis: membrane technology, water chemistry and industrial applications*. Edited by Z. Amjad. New York, Van Nostrand Reinhold, 1993.

Qasim, S. R. et al., "Estimating costs for treatment plant construction, American Water Works Association Journal, August 1992.

Qasim, S.R., Wastewater treatment plants: planning, design and operation. ^{C}2 ed. Lancaster, Pensylvania, Technomic, 1999.

Reed, S.C., Middlebrooks, E.J.and Crites, R.W ،.*Natural systems for waste management and treatment*. New York, McGraw Hill., 1988.

Reed, S. C., Natural Systems for Wastewater Treatment. Manual of practice FD-16. Arlington, Virginia, Water environment Federation, 1990.

Rowe, D.H. and I. H. Abdel-Magid ،*Handbook of wastewater Reclamation and Reuse*. Boca Raton, Florida, Lewis , 1995.

Sanks, R.L. and T. Asano ،*Land treatment and disposal of municipal and industrial wastewater*. Michigan, Ann Arbor Science, 1976.

Schoeman, J.J. et al., "Evaluation of reverse osmosis for electroplating effluent treatment ،"*Water Science and Technology*, vol 25, no 10, 1992, pp 79-93

United Nations Environment Programme, Sourcebook of alternative technologies for freshwater Augmentation in Latin America and the Caribbean. http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/techpublications/TechPubA-c./

____, Sourcebook of Alternative Technologies for Freshwater Augmentation in Some Countries in Asia . http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/techpublications/TechPub-8e./

United States Bureau of Reclamation ،*Water treatment estimation routine* (WaTER), User manual. August 1999.

____, *Detailed costing document for the centralized waste treatment industry*. EPA 821-R-98-016. Washington, D. C., 1998.http://www.epa.gov/ostwater/guide/cwt/final/costing.pdf.

____, *National pollutant discharge elimination system: secondary treatment standards*. Washington, D. C., USEPA, 2002. http://cfpub.epa.gov/npdes/techbasedpermitting/sectreat.cfm.

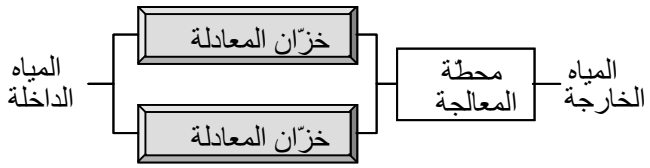
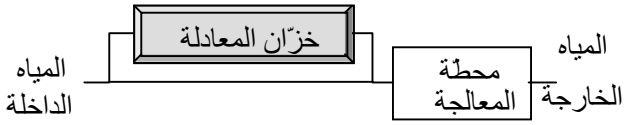
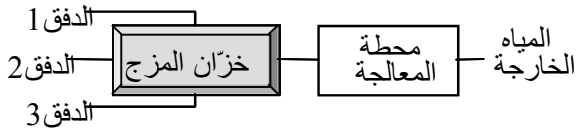
____, Estimating water treatment costs, Vol. 2, Cost curves applicable to 200 mgd treatment plants. Washington, D. C., EPA, 1979. (EPA-600012-79-162).

Wagner, J ،.*Membrane filtration handbook: practical tips and hints*. Osmonics, Inc., 2001.

Water Authority of Jordan .*Wastewater Sector*, http://www.mwi.gov.jo/waj/WAJ%20Web%20 Page/wastewater.htm.

Water Environment Federation and American Society of Civil Engineers ،*Design of Municipal Wastewater Treatment plants,* Volume 1. WEF Manual of Practice No.8 and ASCE Manual and Report on Engineering Practice No.76. Vermount, Book Press Inc.,1992.

World Bank ،*Municipal wastewater treatment in Central and Eastern Europe: present situation and cost effective development strategies*, The World Bank Group, Washington, D.C., 1998

العملية	وصف العملية	رسم توضيحي
تحويل الدفق المتناوب	يتناوب خزّانان على التعبئة والتفريغ لفترات متتابعة	
تحويل الدفق المتقطّع	يُحوّل الدفق إلى خزّان معادلة بمعدل متزايد ثمّ يدخل الدفق المحوّل إلى النظام بمعدّل مضبوط	
مزج تام ودفق موحّد	تمتزج عدّة تدفّقات في خزّان في بداية عملية المعالجة	
مزج تام دفق ممتزج	يوضع خزّان كبير للاستبقاء، تام الامتزاج قبل محطة المعالجة، لمعادلة المتغيرات في مجرى المياه الداخلة والحصول على صرف ثابت