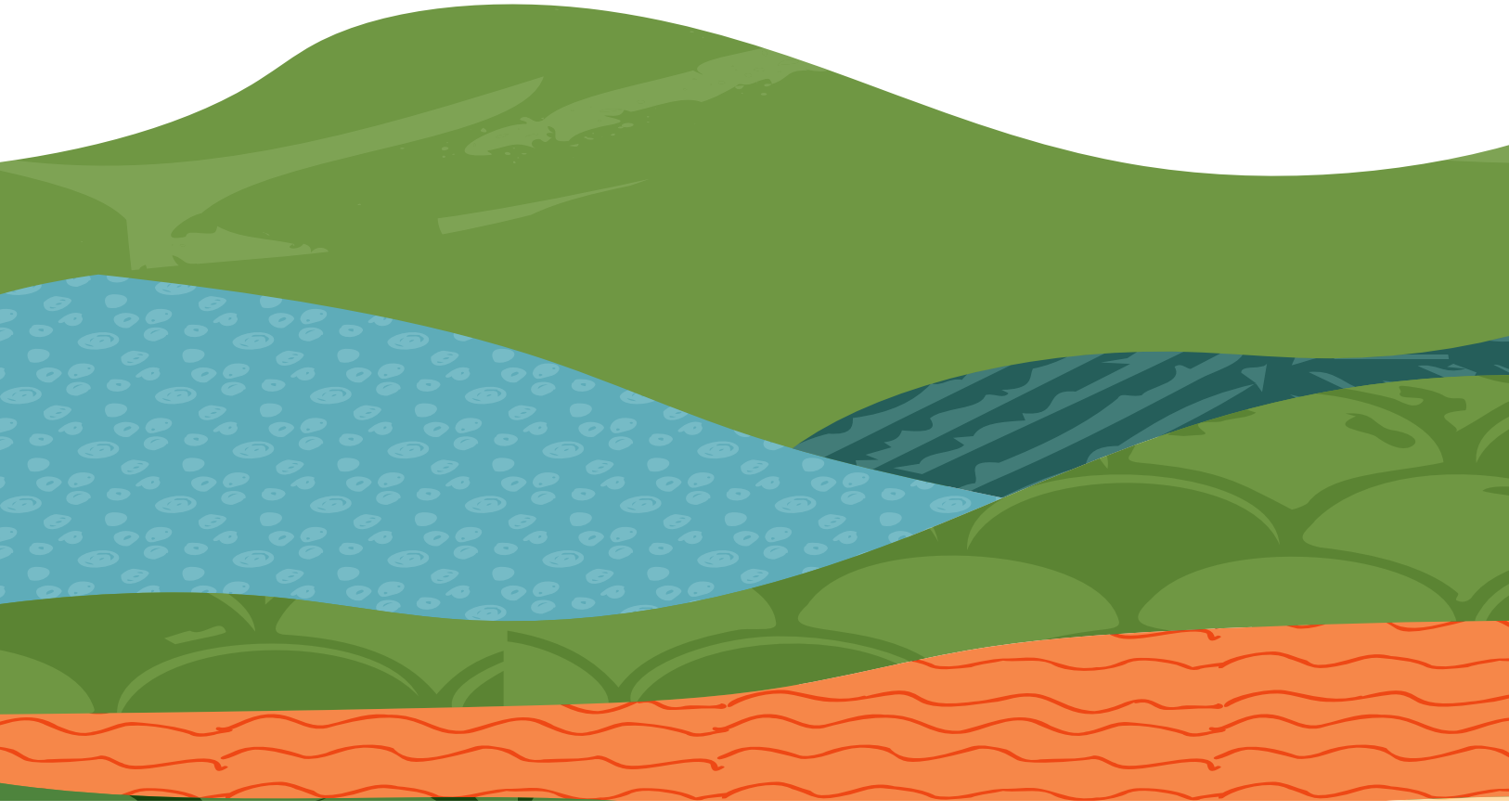
المجلس الوزاري العربي المشترك للمياه والزراعة

الاستخدام الآمن للحمأة في الزراعة في المنطقة العربية

مسودة للنقاش



منظمة
الأغذية والزراعة
للأمم المتحدة

المحتويات

الاختصارات 6
1. الإطار العام والأهداف الرئيسية 7
1.1 خلفية 7
1.2 نِطَاق 7
2. المقدمة 8
3. إدارة الحمأة 10
3.1 نوع الحمأة وجودة الحمأة 10
3.2 كمية الحمأة 13
3.3 معالجة الحمأة 14
3.4 طرق التخلص من الحمأة 18
4. الجوانب الاجتماعية والاقتصادية 20
4.1 استخدام الحمأة كمدخلات منخفضة التكلفة كسماد و/أو محسن للتربة 20
4.2 القبول الاجتماعي 20
4.3 حوافز إعادة استخدام الحمأة 21
4.4 معوقات إعادة استخدام الحمأة 21
5. الإطار التنظيمي 23
5.1 القوانين واللوائح والمعايير المعتمدة 23
5.2 أدوار أصحاب المصلحة 23
6. التأثير البيئي 25
6.1 بنية التربة ونوعيتها 25
6.2 تأثير استخدام الحمأة على مصادر المياه 25
6.3 استخدام الحمأة مقابل تغير المناخ 26
7. الجوانب الصحية 27
7.1 المخاوف الصحية 27
7.2 المعايير والمبادئ التوجيهية الدولية بشأن إعادة الاستخدام الآمن للحمأة 27
8. إدارة تطبيق الكتلة الحيوية على الأراضي الزراعية 31
8.1 العناصر الغذائية المتوفرة في الكتلة الحيوية للنباتات 31
8.2 النقل والتخزين 32
8.3 أفضل ممارسة 32
8.4 تنمية القدرات 32
8.5 دور البحث والتطوير 33
9. الاستنتاجات والتوجيهات المحتملة 34
9.1 الاستنتاجات 34
9.2 الاتجاهات الممكنة 34
10 المراجع 35

قائمة جداول

الجدول 1. الخصائص الفيزيائية لأنواع مختلفة من الحمأة 10

الجدول 2. البيانات النموذجية للخصائص الفيزيائية وكميات الحمأة الناتجة من أنواع **عمليات** وتشغيل مختلفة لمعالجة مياه الصرف الصحي 11

الجدول 3. التركيب النموذجي للحمأة الأولية والثانوية الناتجة في محطات معالجة مياه الصرف الصحي (Metcalf and Eddy, 2003) أ 12

الجدول 4. التركيب الكيميائي للحمأة الخام والمهضومة 13

الجدول 5. أنظمة درجة الحرارة-الزمن الأربعة لتخفيض مسببات الأمراض للفئة A بموجب البديل 1 28

الجدول 6. حدود الملوثات المستخدمة في الأراضي (أساس الوزن الجاف) في لوائح الجزء 503 من وكالة حماية البيئة الأمريكية (Doula, 2017) 29

الجدول 7. مقارنة مستويات المغذيات في الأسمدة التجارية والكتلة الحيوية الناتجة من مياه الصرف الصحي(أ) 31

الجدول 8. محتوى الحمأة من المواد الصلبة وخصائص التعامل معها 32

قائمة الأشكال

الشكل 1. خيارات مخططات تدفق الحمأة لمعالجة الحمأة والتخلص مكونة من مجموعة متنوعة من العمليات ووحدات العمليات المتاحة (Metcalf and Eddy, 2003). 15

الشكل 2. توزيع الرطوبة في الحمأة (Tsang and Vesilind, 1990) 17

تنويه

تم اعداد ومراجعة التقرير حول " الاستخدام الآمن للحمأة في الزراعة في المنطقة العربية" من قبل المكتب الاقليمي للشرق الادنى وشمال افريقيا لمنظمة الامم المتحدة للأغذية والزراعة (الفاو) في اطار دعم الامانة الفنية المشتركة للمجلس الوزاري المشترك للمياه والزراعة (المكونة من الامانة الفنية للمجلس العربي للمياه والمنظمة العربية للتنمية الزراعية) لتنفيذ توصية اللجنة الفنية المشتركة رفيعة المستوى للمياه والزراعة في اجتماعها المنعقد بتاريخ 18 اكتوبر 2022 والمتعلقة بالبند الثاني الخاص باستخدام الموارد المائية غير التقليدية في الزراعة.

الاختصارات

SRT	عمر مكوث الحمأة
F/M	نسبة الغذاء للحمأة (kg BOD/kg MLSS.d)
OFMSW	الجزء العضوي من النفايات الصلبة البلدية
U.S. EPA	وكالة حماية البيئة الأمريكية
WWTP	محطة معالجة مياه الصرف الصحي
TSS	إجمالي المواد الصلبة العالقة
VSS	المادة الصلبة المتطايرة
Yactual	العائد الفعلي للكتلة الحيوية
COD	الطلب على الأوكسجين الكيميائي
WAS	الحمأة المنشطة الناتجة
BOD	الطلب على الاكسجين الحيوي
DS	المواد الصلبة الجافة
MFT	المواد الصلبة الجافة
EQ	الجودة الاستثنائية
GHG	غازات الدفيئة
kgCO2-eq	مكافئ ثاني أكسيد الكربون

1. الإطار العام والأهداف الرئيسية

1.1 خلفية

عُقد الاجتماع الوزاري المشترك الثاني للمياه والزراعة في يناير 2022 حيث قرر وزراء الموارد المائية ووزراء الزراعة مجموعة من القرارات حول موضوعات مختلفة، من بينها استخدام موارد المياه غير التقليدية للزراعة.

طلبت اللجنة الفنية المشتركة رفيعة المستوى للمياه والزراعة (HLJTC)، في اجتماعها الذي عقد في أكتوبر/ تشرين الأول 2022، من الأمانة الفنية المشتركة ومنظمة الأغذية والزراعة إعداد ورقة حول الاستخدام الآمن للحمأة الناتجة عن مياه الصرف الصحي المعالجة لأغراض الزراعة في الشرق الأدنى ومنطقة شمال أفريقيا.

2.1 نِطَاق

الهدف من هذه الورقة هو تزويد صناع القرار على المستوى القطري بالمعلومات الأساسية والمعلومات والبيانات والتحليلات اللازمة لاتخاذ قرار بشأن التوجهات المستقبلية والاستراتيجيات الإقليمية بشأن الاستخدام الآمن للحمأة في الزراعة في المنطقة العربية.

تقدم الورقة استنتاجات وتوجهات استراتيجية محتملة تتعلق بالاستخدام الآمن للحمأة في الزراعة لدعم عملية اتخاذ القرار.

2. المقدمة

المنتج الثانوي الرئيسي لمحطات معالجة مياه الصرف الصحي هو الحمأة (sludge) والتي هي مادة رقيقة القوام (slurry) تحتوي على نسبة عالية من المواد الصلبة العالقة. يتم إنتاج الحمأة من (1) المواد الصلبة الخام الموجودة في مياه الصرف الصحي الخام التي تدخل إلى محطة معالجة مياه الصرف الصحي (WWTP) والتي تسمى الحمأة الأولية، و(2) من الكتلة الحيوية الزائدة والتي تعد أحد المنتجات النهائية لعمليات التحلل البيولوجي والتي تسمى الحمأة الثانوية . يتم إنتاج حوالي 2-1 لتر تقريبًا لكل شخص من الحمأة المركزة من محطة معالجة مياه الصرف الصحي البلدية التي تستقبل حوالي 100 إلى 200 لتر من مياه الصرف الصحي للشخص الواحد. إن إدارة هذه النفايات الصلبة والتي هي منتج ثانوي من عمليات معالجة مياه الصرف الصحي معقدة للغاية ومكلفة من حيث المعالجة والنقل والتخلص النهائي بسبب محتواها بشكل أساسي من المعادن الثقيلة ومسببات الأمراض والمحتوى المائي، حتى يتم نقلها وأيضًا امتثالها للتشريعات البيئية المعمول بها. يعد تصريف الحمأة المهدرة هو الأكبر من حيث حجم النفايات الثانوية التي يتم إزالتها من محطة معالجة مياه الصرف الصحي البلدية. ويعود الحجم الكبير للحمأة إلى محتواها المائي العالي الذي يصل إلى 95%. وفي الواقع، وبسبب النمو المستمر لعدد السكان والأنشطة الصناعية، فإن كميات الحمأة تتزايد بشكل كبير كأحد المنتجات النهائية لعمليات معالجة مياه الصرف الصحي بنفس الوتيرة.

القضايا الصعبة الرئيسية لعملية إدارة الحمأة هي:

- حجم الحمأة مرتفع بسبب محتواها المائي العالي، وبالتالي فإن التخلص منها مكلف ومعقد.
- قد يؤدي التخلص غير السليم من الحمأة إلى التلوث البيئي، بما في ذلك مصادر المياه والتربة والنباتات والهواء، وذلك بالمعادن الثقيلة والمواد العضوية ومسببات الأمراض والملوثات الدقيقة والروائح الكريهة وانبعاث NH3 وH2S وما إلى ذلك.

ونظراً لأنه يعيد تدوير العناصر الغذائية الأساسية والمواد العضوية في التربة، فأن نشر حمأة الصرف الصحي المعالجة على الحقول يفيد القطاع الزراعي كأحد بدائل التخلص من الحمأة. وتسمى حمأة مياه الصرف الصحي المعالجة (treated sludge) أيضًا بالمواد الصلبة الحيوية (biosolids). ومع ذلك، من أجل ضمان إعادة تدوير مستدام، وحماية البيئة وصحة الأشخاص والحيوانات، يجب تنفيذ نظام مراقبة، تم تطويره بعناية فائقة، للمنطقة التي تستقبل الحمأة. ووفقًا للبند 4 من الإطار التوجيهي للنفايات رقم EEC/75/442 للاتحاد الأوروبي، يُفضل نشر النفايات على الأرض عندما يتم الحصول على فوائد زراعية، وهو ما يؤدي عند القيام بذلك إلى ضمان تحسين التربة لنمو المحاصيل وبينما أيضًا يحافظ على جودة البيئة (Doula et al., 2017). تحتوي الحماة المعالجة غالبا على مادة عضوية مستقرة (stabilized) وعناصر غذائية (أي N وP وK وCa وMg)؛ وبالتالي فهي ذات قيمة زراعية. يمكن استخدام العناصر الغذائية الموجودة في الحمأة بأمان كسماد لتحفيز نمو النباتات وبالتالي زيادة حجم المحاصيل الزراعية (EC, 2001; Pasda et al., 2005; U.S. EPA, 2023).

ومع ذلك، من الضروري ملاحظة أن الإطار القانوني الذي يحدد إطار النشر على الأراضي، مثل التوجيه الإطاري للنفايات EEC/75/442 بصيغته المعدلة 91/156/EEC، التوجيهات EEC/86/278 بشأن نشر حمأة الصرف الصحي على الأرض وEEC/91/676 بشأن حماية المياه من التلوث الناجم عن النترات من المصادر الزراعية، و U.S. EPA/625/R-95/001، يقلل من أهمية دور التربة أو

على الأقل لا يعتبرها داخلية (Doula et al., 2017). وفقًا للتوجيه رقم EEC/86/278 الصادر عن الاتحاد الأوروبي، يجب على المَزارع اتباع إرشادات معينة عند استخدام حمأة الصرف الصحي كسماد لتجنب تعريض التربة والنباتات والحيوانات والأشخاص للخطر مع الحفاظ على جودة التربة والمياه السطحية والمياه الجوفية، فهو يضع حدودًا محددة لتركيزات سبعة معادن ثقيلة مسموح بها في التربة والتي قد تكون سامة للنباتات والبشر.

ينبغي للمجتمعات الحديثة أن تنفذ سياسات تشجع على إعادة استخدام أي مورد يمكن استخدامه، بما يتوافق مع الأهداف العامة والخاصة للاستدامة. يُفضل نشر النفايات على الأرض على التدمير الحراري أو دفن النفايات في ترتيب الاختيارات، بشرط إثبات وجود فائدة للزراعة (أو التحسين البيئي) (Waste Framework Directive issued by the EU, 86/278, EC). وينبغي النظر إلى حمأة الصرف الصحي من هذا المنظور كمنتج ثانوي يجب الاستفادة منه وليس كنفايات.

تهتم الدراسة الحالية بالمتطلبات والمتطلبات الأساسية الواجب توافرها لضمان إعادة الاستخدام المستدام والآمن لحمأة الصرف الصحي في التربة الزراعية في الدول العربية. من الضروري إنشاء وتطبيق أساليب وعمليات وأدوات لرصد مناطق إعادة الاستخدام قبل وأثناء وبعد التطبيق من أجل الحفاظ على الاستدامة البيئية.

3. إدارة الحمأة

3.1 نوع الحمأة وجودة الحمأة

يشكل الماء غالبية الحمأة. يتراوح تركيز المواد الصلبة الجافة عادةً بين 1 و5 بالمائة. الخصائص الفيزيائية لمختلف أنواع الحمأة موضحة في الجدولين 1 و2. أن تكوين الحمأة يتأثر بكل من العوامل التالية: تكنولوجيا المعالجة البيولوجية (مرشح متدفق، الحمأة المنشطة، ملامسات بيولوجية دوّارة)، طبيعة مياه الصرف الصحي الواردة (منزلية أو صناعية)، نوع نظام الصرف الصحي (مجتمعة أو منفصلة)، ونظام التشغيل (معدلات التحميل المطبقة، وعمر مكوث الحمأة (SRT)، وما إلى ذلك). أن اختيار طرق معالجة الحمأة يتأثر بنظام تشغيل محطة المعالجة.

الجدول 1. الخصائص الفيزيائية لأنواع مختلفة من الحمأة

Sludge	Colour	Other physical properties	odour	Digestibility (Amenability to further biological stabilization)
Primary sedimentation	Grey	Slimy	Extremely offensive	Readily digested
Chemical precipitation (primary)	Black, red surface if high in iron	Slimy, gelatinous, gives off considerable gas	Offensive	Slower rate than primary sedimentation
Activated sludge	Brown, dark if nearly septic	Flocculent	Inoffensive, earthy when fresh, putrefies rapidly	Readily digested
Trickling filter humus	Brownish	Flocculent	Relatively inoffensive, decomposes slowly	Readily digested
Digested sludge	Dark brown to black	Contains a very large quantity of gas	Inoffensive if thoroughly digested; like tar or loamy soil	Well digested
Septic tank sludge	Black		Offensive (H_2S) unless very long storage time	Mostly stabilized

Source: Loehr and Jewell (1979) cited in Polprasert and Koottatep(2017)

الجدول 2. البيانات النموذجية للخصائص الفيزيائية وكميات الحمأة الناتجة من أنواع عمليات وتشغيل مختلفة لمعالجة مياه الصرف الصحي

Treatment operation or process	Specific gravity of solids	Specific gravity of sludge	Dry solids, kg/103 m3	
			Range	Typical
Primary sedimentation	1.4	1.02	110-170	150
Activated sludge (waste biosolids)	1.25	1.005	70-100	80
Trickling filter (waste biosolids)	1.45	1.025	60-100	70
Extended aeration (waste biosolids)	1.30	1.015	80-120	100**a**
Aerated lagoon (waste biosolids)	1.30	1.01	80-120	100**a**
Filtration	1.20	1.005	12-24	20
Algae removal	1.20	1.005	12-24	20
Chemical addition to primary tanks for phosphorous removal				
• Low lime (500-350 mg/L)	1.9	1.04	240-400	300**b**
• High lime (1600-800 mg/L)	2.2	1.05	600-1300	800**b**
Suspended growth nitrification	-	-	-	-**c**
Suspended growth denitrification	1.20	1.005	12-30	18
Roughing filters	1.28	1.02		-**d**

a Assuming no primary treatment.
b solids in addition to that normally removed by primary sedimentation.
c Negligible
d Included in biosolids production from secondary treatment processes
Adopted from: Metcalf and Eddy (2003)

يبين الجدولين 3 و4 التركيبات الكيميائية النموذجية للحمأة الخام والمهضومة. توجد كميات كبيرة من المعادن الثقيلة، والتي ترتبط بشكل أساسي بالمواد الصلبة العالقة، بشكل خاص في الحمأة الأولية. كثيرا ما تصبح الحمأة غير مناسبة لإعادة الاستخدام الزراعي بسبب المعادن الثقيلة الناتجة عن التصريفات الصناعية، أو جريان مياه الأمطار، أو الانبعاثات المرورية والمصادر المنزلية مثل تصريف مخلفات التعفين (septage) والتي عادة ما تكون غنية بالمعادن الثقيلة. أن إمكانية إعادة استخدام الحمأة في المنطقة المخدومة بأنظمة صرف صحي منفصلة أكبر من تلك المخدومة بأنظمة صرف صحي مشتركة.

تتكون الحمأة الثانوية بشكل رئيسي من الكتلة الحيوية، والتي يتم إنتاجها أثناء التحويل البيولوجي للمواد العضوية. عادةً ما يكون العائد الفعلي (Yactual) للكتلة الحيوية عضوية التغذية (heterotrophic biomass) في حدود 0.5-0.6 (kgVSS/kg CODbiodegraded). يتراوح محتوى المادة العضوية الثانوية للحمأة عادة بين 60-85%. يؤثر وجود أو عدم وجود الترسيب الأولي على معدلات إنتاج الكتلة الحيوية الثانوية. قد تلتصق المواد الصلبة العالقة الموجودة في مياه الصرف الصحي (المترسبة مسبقًا) إلى ندف الكتلة الحيوية مما يزيد من معدلات إنتاج الحمأة الثانوية. في حال عدم وجود وحدات ترسيب أولي، يجب إيلاء اهتمام أكبر باحتمالية تلوث الحمأة الثانوية (Veenstra, 2002) .

تعتبر الكتلة الحيوية مكونًا رئيسيًا للحمأة الثانوية حيث يتم انتاجها كناتج لعملية التحويل البيولوجي للمادة العضوية. تتحلل الكتلة الحيوية عضوية التغذية عادة بمعدل 0.5-0.6 (kgVSS/kg CODbiodegraded). ويتراوح نسبة محتوى المواد العضوية في الحمأة الثانوية عادة من 60 إلى 85%. يتأثر معدل انتاج الحمأة الحيوية الثانوية بوجود أحواض الترسيب من عدمه. عادة ما يكون معدل إنتاج الحمأة الثانوية أعلى من القيم التي يتم حسابها على أساس محصول إنتاج الحمأة (sludge yield) وذلك نتيجة امتزاز المواد الصلبة العالقة الموجودة في مياه الصرف الصحي بندف الكتلة الحيوية. من الضروري دراسة التلوث المحتمل للحمأة الثانوية بعناية عندما لا يتم تضمين حوض الترسيب الأولي في العملية.

الجدول 3. التركيب النموذجي للحمأة الأولية والثانوية الناتجة في محطات معالجة مياه الصرف الصحي (Metcalf and Eddy, 2003) أ

Item	Untreated primary sludge		Digested primary sludge		Untreated activated sludge
	Range	Typical	Range	Typical	Range
Total dry solids (TS), %	5-9	6	2-5	4	0.8-1.2
Volatile solids (% of TS)	60-80	65	30-60	40	59-88
Grease and fats (% of TS):					
• Ether soluble	6-30	-	5-20	18	-
• Ether extract	7-35	-	-	-	5-12
Protein (%TS)	20-30	25	15-20	18	32-41
Nitrogen (N, % of TS)	1.5-4	2.5	1.6-3.0	3.0	2.4-5.0
Phosphorous (P_2O_5, % of TS)	0.8-2.8	1.6	1.5-4.0	2.5	2.8-11
Potash (K_2O, % of TS)	0-1	0.4	0-3.0	1.0	0.5-0.7
Cellulose (% of TS)	8-15	10	8-15	10	-
Iron (not as sulfide) (% of TS)	2.0-4.0	2.5	3.0-8.0	4.0	-
Silica (SiO_2, % of TS)	15-20	-	10-20	-	-
pH	5.0-8.0	6.0	6.5-7.5	7.0	6.5-8.0
Alkalinity (mg/L as $CaCO_3$)	500-1500	600	2500-3500	3000	580-1100
Organic acids (mg/L as HAc)	200-2000	500	100-600	200	1100-1700
Energy content, kJ/kg TS	23,000-29,000	25,000	9000-14,000	12,000	19,000-23,000

a Adapted in part from U.S. EPA (1979)

Note: kJ/kg x 0.4303 = Btu/lb

الجدول 4. التركيب الكيميائي للحمأة الخام والمهضومة

Item	a Raw Primary Sludge		b Digested Sludge	
	Range	Typical	Range	Typical
Total dry solids (TS), %	2.0-7.0	4.0	6.0-12.0	10.0
Volatile solids (% of TS)	60-80	65	30-60	40.0
Grease and fats (ether-soluble, % of TS)	6.0-30.0	-	5.0-20.0	-
Protein (% of TS)	20-30	25	15-20	18
Nitrogen (% of TS)	1.5-4.0	2.5	1.6-6.0	3.0
Phosphorous (P_2O_5, % of TS)	0.8-2.8	1.6	1.5-4.0	2.5
Potash (K_2O, % of TS)	0-1.0	0.4	0.0-3.0	1.0
Cellulose (% of TS)	8.0-15	10.0	8.0-15.0	10.0
Silica (SiO_2, % of TS)	15-20	-	10.0-20.0	-
pH	5.0-8.0	6.0	6.5-7.5	7.0
Alkalinity (mg/L as $CaCO_3$)	500-1,500	600	2,500-3,500	3000

a Refer to sludge settled in primary sedimentation tanks.
b Mostly refers to anaerobically digested sludge.
Source: Loehr et al. (1979) cited in Polprasert and Koottatep (2017)

3.2 كمية الحمأة

3.2.1 معدلات إنتاج الحمأة الأولية

وفقًا لوكالة حماية البيئة الأمريكية U.S. EPA ، تتراوح معدلات الإنتاج اليومي من المواد الصلبة العالقة من 70 إلى 110 جم من المواد الصلبة العالقة/فرد في اليوم. ويبلغ معدل انتاج الحمأة الأولي 50-75 جم من المواد الصلبة الذائبة/فرد في اليوم بافتراض كفاءة ترسيب نموذجية تبلغ 65%، وعند مقارنة هذه المعدلات بالبيانات الميدانية من أوروبا، فإن هذه الأرقام مرتفعة جدًا. يمكن أن تعزى معدلات إنتاج الحمأة الأولية المرتفعة هذه في الولايات المتحدة الأمريكية إلى الاستخدام الواسع النطاق لمطاحن المطبخ هناك. تختلف كمية الحمأة الأولية التي تنتجها مياه الصرف الصحي البلدية في أوروبا وفقًا لنوع نظام الصرف الصحي المستخدم. ففي أنظمة الصرف الصحي المنفصلة، يتراوح إجمالي المواد الصلبة العالقة (TSS) المنتجة من 40 إلى 50 جرامًا للفرد في اليوم؛ وفي أنظمة الصرف الصحي المشتركة، يمكن أن تصل إلى 60 جم/الفرد/اليوم. إنه يرفع معدل إنتاج الحمأة الأولية إلى 30 جم من المواد الصلبة العالقة /للفرد في اليوم بشكل منفصل و40 جم من المواد الصلبة العالقة /للفرد في اليوم في أنظمة الصرف الصحي المجمعة، بافتراض أن 70% من المواد الصلبة العالقة تترسب في أحواض الترسيب الأولية (Polprasert and Koottatep, 2017).

البيانات المتعلقة بإنتاج الحمأة في البلدان النامية ليست متاحة بسهولة لأن معظم المدن لا تملك أنظمة صرف صحي مناسبة لنقل مياه الصرف الصحي إلى محطات المعالجة المركزية. ومع ذلك، يمكن تقدير أن كل شخص ينتج ما بين 25 إلى 40 كجم من المادة الصلبة الجافة من الحمأة سنويًا (68-109 جم DS/فرد) أو حوالي 800 كجم من الحمأة الرطبة (95% محتوى مائي) سنويًا (2.2 لتر/فرد في اليوم) (Polprasert and Koottatep, 2017).

في فلسطين، يبلغ إنتاج الحمأة المحدد في الضفة الغربية وغزة وفي عموم أنحاء فلسطين على التوالي 42 و32 و37 جراماً من المادة الجافة يوميا (PWA, 2014). ويبلغ إنتاج الحمأة الرطبة في الضفة الغربية وغزة وفي عموم أنحاء فلسطين على التوالي 3.5 و0.55 و1.92 لتر/فرد يوميا.

3.2.2 معدلات إنتاج الحمأة الثانوية (SAW).

إنتاج الحمأة الثانوية هو نتيجة للتحويل البيولوجي للمادة العضوية إلى الكتلة الحيوية. عادة، تتراوح الكمية الفعلية للكائنات غيرية التغذية بين 0.6-0.5 كجم من الكتلة الحيوية/كجم من الطلب الأوكسجيني البيولوجي المتحلل بيولوجيًا (Horan, 1990). ومع ذلك، في محطات معالجة مياه الصرف الصحي، يكون إنتاج الكتلة الحيوية الثانوية أعلى بسبب حقيقة انه (Veenstra, 2002):

- يتم تضمين عملية النترجة في النظام. تتمتع البكتيريا المنترتة (nitrifiers) بمعاملات إنتاجية أقل بكثير (lower yield coefficients) ولكنها تساهم في إنتاج الكتلة الحيوية بشكل عام.
- تلتصق المواد الصلبة العالقة المتبقية من مياه الصرف الصحي الواردة بندف الكتلة الحيوية مما يؤدي إلى زيادة إجمالي كمية المواد الصلبة الجافة المتراكمة داخل حوض التهوية. وهذا يؤثر بشكل مباشر على معدلات إنتاج الحمأة الزائدة. قد تتضاعف معدلات إنتاج الحمأة إلى 1.2-0.8 كجم من المواد الصلبة العالقة/كجم من BOD المتحلل بيولوجيًا.

وتتأثر معدلات إنتاج الكتلة الحيوية الثانوية أيضًا بدرجة الحرارة. تؤدي زيادة درجة الحرارة إلى ارتفاع معامل التنفس الداخلي (kd). ونتيجة لذلك، تنتج البلدان الاستوائية في كثير من الأحيان حمأة ثانوية أقل من البلدان ذات درجات الحرارة المعتدلة (Popel, 1993). وقد يكون هذا هو الحال في الدول العربية، خاصة دول الخليج وغيرها من المناطق الجغرافية الحارة في داخل دول أخرى مثل الأردن وفلسطين. بالنسبة لأنظمة الحمأة المنشطة ذات نسب F/M منخفضة أو عمر الحمأة المرتفع، يصبح تنفس الحمأة الداخلية أكثر أهمية. ويرتبط غياب خزانات الترسيب الأولية وزمن مكوث الحمأة المرتفع بما يسمى بوضع التشغيل للتهوية الممتدة. وهذا له تأثير كبير على معدلات إنتاج الحمأة المنشطة بشكل عام، مما يعني انخفاض معدلات إنتاج الحمأة الثانوية عند انخفاض نسبة F/M.

يمكن تحفيز إنتاج الحمأة الثانوي من عملية تخليق الكتلة الحيوية (biomass synthesis) ومن أيضا امتزاز المواد الصلبة العالقة المتدفقة بنسبة تركيز المواد الصلبة العالقة إلى تركيز الطلب على الاكسجين الحيوي (TSS/BOD ratio) (Popel, 1993). يمكن إيجاد كمية إنتاج الحمأة المنشطة المهدورة (WAS) في محطات الحمأة المنشطة بدلالة من نسبة F/M التشغيلية. وتتراوح كمية المواد الصلبة العالقة النموذجية بين 1.2-0.4 كجم من المواد الصلبة العالقة/كجم من الطلب على الاكسجين الحيوي المزال (kg TSS/kgBODremoved) (Gray, 1990) وذلك على افتراض استخدام أحواض الترسيب الأولية قبل المعالجة البيولوجية. فيما يتعلق بإنتاج الحمأة المنشطة المهدورة (WAS) في أنظمة التهوية الممتدة، قد تضيف المواد الصلبة المتدفقة إلى كمية إنتاج الحمأة الثانوية وذلك بسبب غياب الترسيب الأولي. عند ارتفاع نسبة F/M، يزداد معدل إنتاج الحمأة.

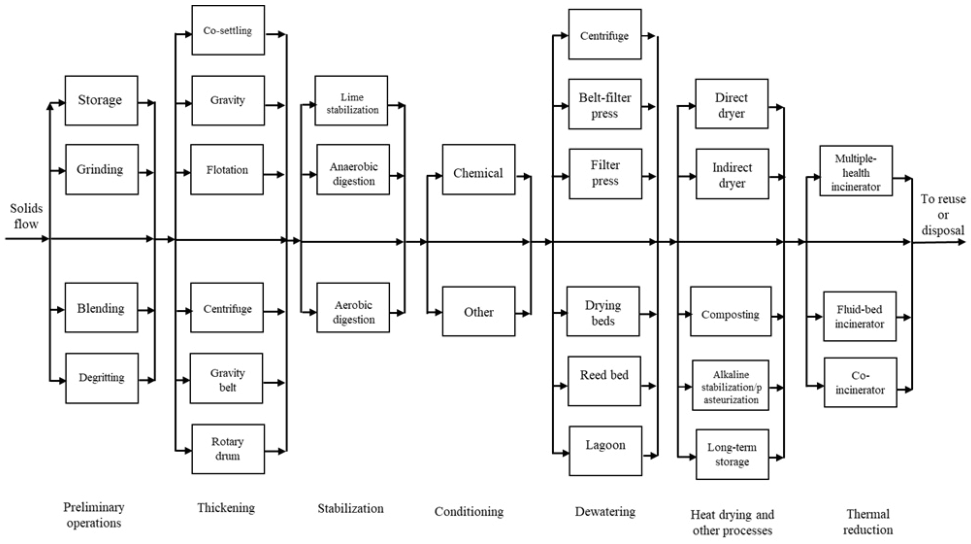
بالنسبة لمرشحات التقطير (Trickling filters)، تكون معدلات إنتاج الحمأة الثانوية أقل بكثير. نظرًا لزمن مكوث الحمأة الأعلى بكثير في المرشح، فإن الكتلة الحيوية تستقر (stabilized) إلى حد مقبول (وبالتالي يطلق عليها عادةً "حمأة الدبال"). وتبلغ معدلات إنتاج الحمأة النموذجية 0.5-0.4 كجم من المواد الصلبة العالقة/كجم من BOD تتم إزالتها للمرشحات ذات التحميل المنخفض و0.6-0.7 كجم من المواد الصلبة العالقة للمرشحات المتقطرة ذات التحميل العالي (Veenstra, 2002).

3.3 معالجة الحمأة

3.3.1 مقدمة

تواجه محطات معالجة مياه الصرف الصحي بشكل متزايد مشاكل في عمليات معالجة الحمأة والتخلص منها. يعرض الشكل 1 مخطط تدفق معمم يشتمل على عمليات وحدات معالجة الحمأة. وكما هو موضح تقريبًا، هناك عدد لا نهائي من التركيبات الممكنة (Metcalf and Eddy, 2003). يعتمد القرار النهائي بشأن طريقة التخلص من الحمأة على التشريعات والتكلفة، بما في ذلك تكاليف رأس المال والتشغيل.

الشكل 1. خيارات مخططات تدفق الحمأة لمعالجة الحمأة والتخلص مكونة من مجموعة متنوعة من العمليات ووحدات العمليات المتاحة (Metcalf and Eddy, 2003).



3.3.2 سماكة الحمأة

يتم تركيز الحمأة أو تثخينها لزيادة محتوى المواد الصلبة الجافة وتحقيق انخفاض كبير في حجم الحمأة. يؤدي انخفاض حجم الحمأة إلى توفير التكاليف في معالجة الحمأة ونقلها إلى مواقع التخلص منها.

يتم تعريف تكثيف الحمأة على أنه إزالة الماء من الحمأة بهدف تقليل حجم الحمأة بشكل كبير. على سبيل المثال، إذا كان من الممكن تكثيف الحمأة التي تحتوي على 0.8% DS إلى 4% DS، فسيتم تحقيق انخفاض بمقدار خمسة أضعاف في حجم الحمأة.

الميزة الرئيسية لتكثيف الحمأة هي توفير التكاليف في عمليات التعامل مع الحمأة النهائية. يتم تحسين عمليات التثبيت ونزح المياه عند تركيزات أعلى للحمأة. الطرق الشائعة لتكثيف الحمأة هي:

1. التكثيف بالجاذبية
2. مكثفات التعويم
3. المكثفات الميكانيكية
4. طرق أخرى (البحيرات)

أصبحت عملية التكثيف الميكانيكي أكثر أهمية في محطات المعالجة حيث تتم إزالة الفسفور كيميائيًا أو بيولوجيًا (Veenstra, 2002).

تبذل أجهزة الطرد المركزي قوى طرد عالية جدًا مما يؤدي إلى إطلاق الماء الزائد من الحمأة. عند مدخل مواد صلبة منخفضة الجفاف، يمكن أن تصل كعكة الحمأة المكثفة إلى محتوى نهائي يبلغ 4 إلى 6% DS (بدون إضافة بوليمر) أو 5 إلى 10% مع إضافة 2 إلى 8 كجم بوليمر/طن DS. علماً أن إضافة البوليمر هي عملية اختيارية.

يتم تشغيل المناخل (sieves) الدوارة أو البراميل (drum) بسرعة دوران منخفضة (5 إلى 25 دورة في الدقيقة) حول محور أفقي ويتم تطبيقها بشكل شائع كمعالجة أولية قبل أنظمة نزح المياه من الحمأة مثل مرشح أو مكابس الحزام. تشتمل براميل الغربال الدوارة على تكييف البوليمر للحمأة قبل إضافتها إلى أسطوانة دوارة مزودة بثقوب تسمى غربال. أثناء الدوران، يتدفق الماء المنفصل من خلال الغربال ويتم طرح الحمأة السميكة (3 – 4% DS) في نهاية الأسطوانة.

مع إضافة البوليمرات يمكن تركيز الحمأة من 0.5-2% إلى 4-8% DS. استهلاك الطاقة منخفض مقارنة بأجهزة الطرد المركزي عالية السرعة.

مكثفات حزام الجاذبية: على وجه الخصوص بالنسبة للحمأة التي تحتوي على نسبة منخفضة من المواد الصلبة الجافة، يمكن أن توفر عملية التكثيف بالجاذبية مصحوبتا

مع تكييف الحمأة تكثيفا فعّالا.

3.3.3 استقرار الحمأة

تجعل عملياتُ التثبيتِ الحمأةَ أقلُّ ضررًا (رائحة) حيث يتم تقليل محتوى المادة العضوية. هناك طرق بيولوجية (الهضم اللاهوائي والهوائي) أو طرق فيزيائية كيميائية (معالجة الجير). إحدى التقنيات الواعدة هي أكسدة الهواء الرطب بواسطة عملية (Vertech (Veenstra, 2002.

تتم ممارسة عملية تثبيت الحمأة على نطاق واسع في محطات معالجة مياه الصرف الصحي لتقليل احتمالية تكوين الرائحة بسبب التحلل الحيوي للمواد العضوية وتسهيل عمليات معالجة الحمأة الإضافية اللاحقة والتخلص منها. الأهداف الرئيسية لعمليات تثبيت الحمأة هي:

- الحد من التلوث بالكائنات الحية الممرضة
- القضاء على تكوين الروائح الكريهة
- تحسين خطوات نزح المياه من الحمأة لاحقا، و
- التقليل من كمية مواد الحمأة الصلبة لكي يتم التخلص منها.

لا يتم تطبيق تثبيت الحمأة بواسطة المواد الكيميائية أو الحرارة بشكل شائع، حيث أنها مكلفة من حيث رأس المال والتكلفة التشغيلية. من خلال التثبيت الكيميائي، فإن الرقم الهيدروجيني العالي المفروض على الحمأة يقلل بشكل فعال من الكائنات الحية الدقيقة، وبالتالي لا يمكن أن يحدث أي تحلل حيوي إضافي للمواد العضوية. نتيجة لارتفاع الرقم الهيدروجيني، قد يؤدي إطلاق NH3 إلى خلق مشاكل رائحة محلية.

يمكن إضافة الجير قبل (المعالجة المسبقة) أو بعد (بعد المعالجة) عملية نزح مياه الحمأة. يمكن استخدام الجير المطفأ (Ca(OH)2) أو الجير الحي (CaO) (قد يساعد الجير الحي على زيادة محتوى المواد الصلبة الجافة في كعكة الحمأة). يتم استخدام الجير المطفأ بشكل شائع في شكل جاف لأنه لا يحتاج إلى الماء ولا يسبب أي مشاكل في التحجيم (scaling) في وحدات نزح المياه اللاحقة من الحمأة. تتراوح الجرعات النموذجية من 100 إلى 500 كجم Ca(OH)2 لكل كجم DS للحفاظ على درجة الحموضة عند حوالي 12 لمدة 30 دقيقة (Metcalf and Eddy, 2003).

تتمثل ميزة التثبيت الجيري للحمأة منزوعة الماء مقارنة بطرق التثبيت البيولوجي في أن الجمع بين الأكسدة الكيميائية الطاردة للحرارة يرفع درجة حرارة الحمأة إلى أكثر من 50 درجة مئوية؛ هذا المزيج مع الرقم الهيدروجيني 10، سوف يطهر الحمأة بشكل فعال، ويعطل (inactivate) بيض الديدان.

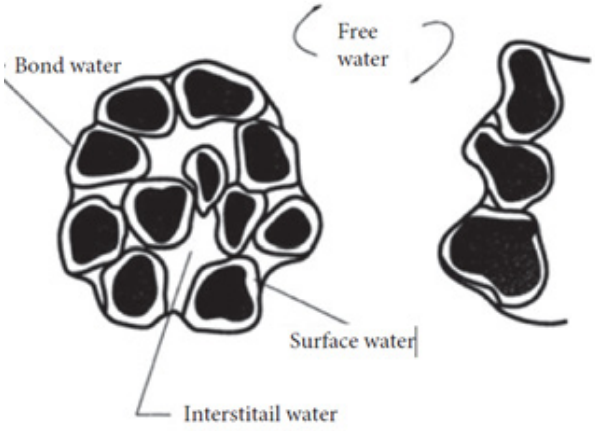
تهدف الحمأة اللاهوائية والهوائية إلى تثبيت المواد العضوية بيولوجيًا باستخدام المفاعلات الحيوية الهوائية أو اللاهوائية. تعتبر عمليات الهضم البيولوجي فعالة للغاية في تقليل المحتوى العضوي للحمأة، ولكنها ليست كافية لإنتاج حمأة خالية من مسببات الأمراض، وبالتالي من الضروري إنشاء وحدات إضافية لمعالجة الحمأة لاحقًا.

3.3.4 تكييف الحمأة

تكييف الحمأة هو خطوة معالجة مسبقة لزيادة كفاءة تكثيف الحمأة وزيادة امكانيات نزح المياه من الحمأة. الطريقتان المستخدمتان الأكثر شيوعًا لتكييف الحمأة هما 1) إضافة المواد الكيميائية أو 2) المعالجة الحرارية (Veenstra, 2002).

يساعد التكييف على تحرير أجزاء الماء المختلفة من الجزيئات العالقة والغروانية. عادة، يمكن التمييز بين 4 أشكال من الماء في الحمأة: المياه الحرة، والمياه الخلالية (الشعرية)، والمياه السطحية والمياه الرابطة (الشكل 2). على وجه الخصوص، فإن إزالة الأجزاء الثلاثة الأخيرة من الماء من جزيئات الحمأة أمر صعب للغاية وينطوي على استهلاك مرتفع للطاقة.

الشكل 2. توزيع الرطوبة في الحمأة (Tsang and Vesilind, 1990)



يتم تطبيق تكييف الحمأة لتحسين تكثيف الحمأة أو عمليات نزح المياه من الحمأة. عن طريق التكييف الكيميائي، تتم إضافة أملاح أو بوليمرات Fe/AL غير العضوية لزعزعة استقرار جزيئات الحمأة وتجميعها في كتل كبيرة. يتضمن التكييف بالمعالجة الحرارية تسخين الحمأة تحت ضغط عالٍ لتحطيم بنية جزيئات الحمأة وبالتالي تحرير جزء الماء من المواد الصلبة.

التكييف الكيميائي

وبشكل عام، فإن جزيئات الحمأة لها طبيعة غروانية؛ يكون الجسيم محاطًا بطبقة مزدوجة مشحونة كهربائيًا، والتي تحدد تكثيف الحمأة وقابليتها لنزح الماء. العمليتان الرئيسيتان المتضمنتان في التكييف هما 1) تحييد الشحنة الكهربائية لجزيئات الحمأة و2) تجسير (bridging) ربط الجزيئات الفردية في ندفة (Veenstra, 2002).

عن طريق التخثر باستخدام كلوريد الحديديك أو الجير أو الشب، يتم ضغط الطبقة المزدوجة للحمأة وتحييدها، وتزعزع استقرار الجزيئات ويتم إطلاق الماء بسهولة أكبر من الحمأة. يعمل هذا النموذج بشكل جيد جدًا في حمأة معالجة المياه. ومع ذلك، بالنسبة لحمأة مياه الصرف الصحي العضوية، لا يفسر النموذج الملاحظات من الميدان. وبسبب هذا النقص، يمكن استخدام نموذج التجسير (bridging) لشرح كيفية تلبد المواد الكيميائية المختلفة للحمأة البيولوجية.

أساسيات نموذج التجسير الكيميائي هي أن الملبدات مثل هيدروكسيدات المعادن والبولي إلكتروليتات العضوية (الشوارد المتعددة العضوية) المتعددة تشكل جزيئات طويلة تجذب نفسها إلى جزيئات الحمأة وتجمعها معًا، مما يخلق بنية تدفق قوية ضرورية لنزح المياه بكفاءة.

يجب معرفة كميات جرعات المكيفات المختلفة التي سيتم تطبيقها عمليًا بعد تحليل الحمأة بواسطة مجموعة متنوعة من الاختبارات مثل زمن الشفط الشعري (CST)، واختبار الجرة (jar test) ، واختبار الترشيح المعدل (MFT). يمكن تقسيم المواد الكيميائية المستخدمة في تكييف الحمأة إلى (1) مواد تخثر غير عضوية (أملاح Fe وAl وCa(OH)2)، و(2) بولي إلكتروليتات عضوية أو بوليمرات تحتوي على بعض المجموعات المتأينة.

تتراوح جرعات Fe/Al النموذجية المطبقة بين 50 إلى 100 كجم/طن DS. في حالة أملاح الحديد، يجب إضافة جرعات جير إضافية تتراوح من 250 إلى 500 كجم مثل Ca(OH)2 لكل طن DS لتوفير درجة حموضة مثالية (11.5) لتجسير الجسيمات.

تعمل المكيفات غير العضوية على زيادة كتلة الحمأة الإجمالية بنسبة 10 إلى 30%، وتَخفِض الجزء العضوي وبالتالي قيمة حرق المواد الصلبة الجافة، وتقلل من إمكانية استخدام الحمأة في الزراعة بسبب زيادة محتوى المواد الكيميائية غير العضوية. المجموعة الأخرى من المكيفات الكيميائية هي البولي إلكتروليتات العضوية أو البوليمرات. وهي تحتوي في الغالب على بعض المجموعات المتأينة مثل مجموعة الكربوكسيل أو الأمينو أو مجموعة أخرى. يجب أن تؤدي البوليمرات نفس الوظيفتين اللتين تؤديهما المواد الكيميائية غير العضوية:

معادلة الشحنة وجسر الجسيمات. تُستخدم البوليمرات الكاتيونية بشكل شائع في معالجة مياه الصرف الصحي حيث تتطابق شحنتها الموجبة مع الجزيئات السالبة الشحنة.

تعمل تركيزات البوليمر المنخفضة التي تصل إلى 0.01-0.02% (كجم بوليمر/كجم من الحمأة الرطبة) بكفاءة في تكييف الحمأة (Veenstra, 2002). عادة ما تحل البوليمرات العضوية محل أملاح Fe/Al من أجل التغلب على المشاكل الرئيسية المرتبطة بهذه المواد الكيميائية غير العضوية. مزايا المواد الكيميائية العضوية على المواد الكيميائية غير العضوية هي:

- الجرعات أقل بنحو 10 مرات على أساس الحمأة الجافة (الجرعات النموذجية فقط 5-10 كجم/طن DS).
- البوليمرات لا تزيد من الجزء الخامل المتبقي (residual inert fraction) من الحمأة.
- قد تسبب البوليمرات أيضًا مشكلات مثل:
- انسداد مرشحات نزح المياه
- تكوين طبقة هلامية على الخلاطات والمضخات.

التكييف بالمعالجة الحرارية

المعالجة الحرارية هي عملية تكييف تتضمن تسخين الحمأة لفترات قصيرة تحت الضغط. عن طريق المعالجة الحرارية، سيتم تغيير بنية كتل الحمأة لتحرير المزيد من الماء من الجزيئات. إن التكلفة الرأسمالية المرتفعة للمعدات تجعل نطاق استخدامها يقتصر على محطات المعالجة الكبيرة فقط (0.2 متر مكعب في الثانية) أو المرافق ذات المساحة المحدودة (Veenstra, 2002).

3.3.5 نزح المياه من الحمأة

تعمل عمليات نزح المياه على تقليل محتوى الماء في الحمأة إلى مستوى يمكن من خلاله التعامل معها على أنها مادة صلبة وليست سائلة. نظرًا لأن الحمأة عندما تصبح شبه صلبة يكون من الأفضل التعامل معها من أجل التخلص منها في مدافن النفايات وكذلك الاستخدام الزراعي والحرق والتجفيف الحراري والنقل. ويتم رفع محتوى المواد الصلبة إلى حوالي 15-30% حسب نوع طريقة نزح المياه وطبيعة الحمأة وظروف التشغيل. وعادة يتم دفع تكلفة التخلص من الحمأة في مدافن النفايات لكل طن من الوزن الرطب، ولذلك يعتبر نزح المياه ذا أهمية حاسمة لتقليل تكلفة التخلص النهائية.

3.3.6 عمليات التجفيف والأكسدة

وتشمل هذه التقنيات عمليات التجفيف الحراري وحرق الحمأة. يستخدم التجفيف الحراري لتقليل محتوى الماء في الحمأة لجعلها أكثر ملاءمة للحرق أو للبيع كسماد. عن طريق الحرق، يتم حرق المادة العضوية لإنتاج بقايا رماد خاملة. وبما أن الجزء القابل للاحتراق من مجمل الحمأة أقل من 75%، تبقى كمية كبيرة من الرماد للتخلص منها (Veenstra, 2002).

تتضمن الأكسدة الرطبة (نظام Vertech) الأكسدة الرطبة للمواد العضوية عند ضغوط عالية مع إمداد إضافي بالأكسجين. تتم التفاعلات الكيميائية عادة عند درجات حرارة أعلى من 200 درجة مئوية. المعدات حساسة للغاية للتآكل في هذه الظروف الخاصة لدرجة الحرارة والضغط ومستويات الأكسجين المذاب.

3.4 طرق التخلص من الحمأة

ويمكن التخلص من الحمأة المتبقية (أو الرماد) على الأرض أو في الماء. يجب ألا يؤدي التخلص النهائي من الحمأة إلى تلويث البيئة، ويجب أن يحافظ على مواردها القيمة و(إعادة استخدامها) ويجب أن يكون اقتصاديًا. في النهاية، ستؤدي الحمأة دائمًا إلى التخلص النهائي منها إما كمواد قابلة للاحتراق في الهواء، أو كمواد صلبة في البحر (مصارف البحر) أو على الأرض. وفي كثير من الدول يتم حظر التخلص من النفايات في المحيطات بسبب الآثار الضارة المحتملة على البيئة المائية.

كثيرا ما يتم إلقاء الحمأة أو البقايا في مكب النفايات الصحي حيث يتم تغطية النفايات بشكل دوري بطبقة من التربة. وينبغي اختيار مكب النفايات وتصميمه بطريقة تمنع تصريف أو ترشيح الملوثات إلى موارد مائية عالية الجودة.

وفقًا لأهداف المعالجة المختلفة، هناك العديد من تقنيات معالجة الحمأة، والتي تستخدم للتخلص البسيط أو لغرض تثمينها (من حيث المغذيات والطاقة) (Ding et al., 2021). وتشمل الطرق الشائعة دفن النفايات، والتسميد، والحرق، والانحلال الحراري، والهضم اللاهوائي، والتطبيق الزراعي، وإعادة تدويرها كمواد بناء (Zhen et al., 2017). يعد طمر النفايات التكنولوجيا الأكثر استخدامًا على نطاق واسع نظرًا لبساطتها وانخفاض تكلفة تشغيلها (Xiao et al., 2021). في بعض المناطق المتقدمة، مثل الاتحاد الأوروبي، يعد التسميد والهضم اللاهوائي من تقنيات معالجة الحمأة السائدة (Kelessedis and Stasinakis, 2012). في الولايات المتحدة، يتم استخدام نصف الحمأة في التطبيقات الزراعية، بينما يستخدم الباقي في مدافن النفايات والحرق (Raheem et al., 2018).

في الصين، الطريقة الأكثر شيوعًا هي طمر النفايات (40%-50%) (Fang et al., 2019)، يليها التبخير، مثل انتاج الذبال أو الطاقة المستردة. يتم إعادة تدوير حوالي 25% من الحمأة لصنع منتجات مفيدة، مثل الطوب، ولا يتم التخلص من 15% من الحمأة بشكل صحيح (Raheem et al., 2018).

يمكن استخدام الحمأة المستقرة كسماد أو كمكيف تربة إذا لم تكن مستويات الملوثات الدقيقة مرتفعة جدًا وفقًا للوائح. يمكن نشر الحمأة السائلة على الأرض بواسطة شاحنات التفريغ. التخلص من الحمأة على الأراضي الزراعية مقبولاً على الرغم من وجود مخاوف جدية بشأن المخاطر الصحية، مثل مسببات الأمراض والملوثات الدقيقة. ومع ذلك، إذا تم التعامل بشكل صحيح مع نشر الحمأة على الأراضي الزراعية بمعدلات جرعات مقبولة، فقد تمثل الحمأة موردًا قيمًا للتطبيقات الزراعية.

يوفر تحويل الحمأة إلى ذبال خيارًا آخر لإعادة الاستخدام. يعد انتاج الذبال المشترك

(co-composting) للحمأة مع النفايات الصلبة المنزلية هو الأكثر جدوى، وقد يقلل من حجم الحمأة النهائي بنسبة 50٪ ويمكن للمنتج النهائي استرداد جزء من تكلفة المعالجة لكل طن من المواد الصلبة الجافة.

4. الجوانب الاجتماعية والاقتصادية

4.1 استخدام الحمأة كمدخلات منخفضة التكلفة كسماد و/أو محسن للتربة

يتم تطبيق الكتلة الحيوية (biosolids) في كثير من الأحيان على الأراضي الزراعية والغابات ومواقع الاستصلاح في شكل سائل أو كعك منزوع الماء بتكلفة قليلة أو بدون تكلفة على مالك الأرض (Vesilind, 2003). إن تطبيق الكتلة الحيوية على الأراضي الزراعية ضمن البرامج الزراعية التي تتضمن زراعة مجموعة متنوعة من المحاصيل والإنتاج الحيواني يستفيد من مكونات المواد الصلبة الحيوية وقد يشمل إنتاج المحاصيل والحيوان الذي يصبح في نهاية المطاف جزءًا من السلسلة الغذائية.

وفي دراسة أجريت في البرازيل على مساحة 2288 هكتارًا من الأراضي الزراعية، تم استخدام 33404 طنًا من الحمأة الجافة. أشارت النتائج التي توصلوا إليها إلى أن الحمأة تُكَمِّل 88% من الجير، و74% من النيتروجين، و73% من P2O5، و35% من K2O اللازمة لنمو الذرة وفول الصويا والفول والشوفان وأشجار الفاكهة. وقد وفر المزارعون ما متوسطه 814 دولارًا أمريكيًا للهكتار بسبب استخدام الحمأة (Bittencourt et al., 2014).

تعد مساحات الأراضي المحدودة وارتفاع تكاليف نقل الحمأة وتخزينها من القيود التي قد تحد من تطبيق الحمأة المعالجة على الأرض. ولذلك، فإن الأخذ في الاعتبار تطبيق المواد الصلبة الحيوية على الأراضي الزراعية أمر ضروري خلال مرحلة التخطيط لمحطة معالجة مياه الصرف الصحي من أجل إدراج توفر الأراضي الزراعية القريبة كأحد أسباب اختيار موقع معالجة محطة معالجة مياه الصرف الصحي.

4.2 القبول الاجتماعي

ومن المهم أن يقوم المهندسون والمشغلون بالعمل معًا من أجل تطوير عدة خيارات للتخلص من الحمأة والمواد الصلبة الحيوية، وذلك باستخدام الخيار الذي يحقق أكبر فائدة في أي وقت (Vesilind، 2003). قد يتغير الأشخاص الذين يوافقون على قبول منتجات الحمأة.

عند تقييم المواقع بهدف استبعاد المناطق التي يحتمل أن تكون غير مناسبة لاستخدام الأراضي، قد تستبعد المعايير الأراضي الحساسة ثقافيًا مثل المقابر القديمة وأراضي الدفن، بالإضافة إلى المناطق الترفيهية العامة.

على الرغم من أن استخدام الحمأة في الزراعة يعد ممارسة شائعة في العديد من الدول ذات الدخل المنخفض، إلا أن المزارعين من ثقافات متنوعة قد يقررون تبنيها من عدمه بسبب أصلها البشري، والرأي السائد بأن مياه الصرف الصحي كريهة ورائحتها كريهة (Keraita et al., 2008). ولذلك، من الضروري النظر في كيفية تصور المزارعين وتصرفاتهم عند وضع الحمأة على التربة.

من خلال المسح، نصار وآخرون (2009) قاموا بدراسة مدى قبول المزارعين واستعدادهم لاستخدام الحمأة المعالجة كبديل للأسمدة العضوية في قطاع غزة. وأظهرت النتائج أن: (أ) ندرة الأسمدة العضوية وارتفاع تكلفتها يمكن أن يشجع المزارعين على استخدام الحمأة المعالجة إذا توفرت كميات كافية من الحمأة المعالجة عند الحاجة؛ (ب) قد يكون المزارعون الذين لم يستخدموا الحمأة المعالجة على الإطلاق على استعداد لاستخدام الحمأة إذا تمت معالجتها بشكل جيد، وأظهر تطبيقها نتائج جيدة،

وكان التعامل معها آمنًا؛ (ج) يفضل غالبية المزارعين استخدام الحمأة لتخصيب الأشجار والمحاصيل الحقلية بدلاً من زراعة جميع أنواع المحاصيل (Nassar et al., 2009).

وفي شمال قطاع غزة، لم يتم استخدام الحمأة في الزراعة لعدة أسباب، بحسب ياسين وعبد ربه (2002)، منها ما يلي: (أ) اعتبار الحمأة روحياً مادة ملوثة؛ (ب) قد تضر الحمأة بالمحاصيل؛ و(ج) تحتوي الحمأة على مسببات الأمراض، وتجذب الحشرات، وتنبعث منها روائح. ومع ذلك، أظهرت أبحاثهم أن استخدام المزارعين للحمأة قد يتأثر بتوافر الحمأة الرخيصة والآمنة والمفيدة. يعتمد استعداد المزارعين لدفع ثمن الحمأة على جودتها وسلامتها عند استخدامها (Yassin and Abed Rabou, 2002).

نتائج البحث الذي أجراه كروغمان وآخرون (2000) حول مخاوف المزارعين بشأن استخدام المواد الصلبة الحيوية على محاصيلهم أظهر أن المزارعين كانوا أكثر قلقًا بشأن ظروف أراضيهم وكانوا أقل اهتمامًا بالمشاكل البيئية والصحية التي قد تسببها الحمأة (Krogmann et al., 2000).

4.3 حوافز إعادة استخدام الحمأة

يتم تطبيق الكتلة الحيوية في كثير من الأحيان على الأراضي الزراعية والغابات ومواقع الاستصلاح في شكل سائل أو كعك منزوع الماء بتكلفة قليلة أو بدون تكلفة على مالك الأرض (Vesilind، 2003). على الرغم من التحيزات السلبية، أدرك المزارعون مزايا وعيوب استخدام الحمأة، وفقًا لبحث أجراه كروغمان وآخرون (Krogmann et al., 2000). لقد أدرك المزارعون أن إضافة الحمأة إلى التربة يمكن أن يحسن خصائصها عن طريق إضافة مادة عضوية، وربما يزيد من إنتاجية المحاصيل.

أفاد تشن وآخرون (2022) أنه وفقًا لأولوية أصحاب المصلحة في قطاع إدارة مياه الصرف الصحي، فانه يمكن تقييم الحمأة كمغذيات ومواد، والتي ستحل محل المنتجات البديلة وتزيد من استخدام الموارد (Chen et al., 2022).

يعد تطبيق الحمأة المعالجة على الأراضي الزراعية خيارًا قابلاً للتطبيق للتخلص النهائي من الحمأة. خاصة انه يواجه العديد من مشغلي محطات معالجة مياه الصرف الصحي تحديًا مستمرًا للعثور على المكان المناسب للتخلص من الحمأة المهدرة. حتى عندما يتم التخلص من الحمأة في مدافن النفايات الصلبة، فإن نقل الحمأة عادة ما يكون مكلفًا للغاية ويتطلب محتوى قليل جدا من الماء لكي يتم تجنب المشاكل التشغيلية في المدفن.

4.4 معوقات إعادة استخدام الحمأة

يعتبر تطبيق الحمأة على الأراضي الزراعية مسألة حساسة. هناك عدد من العوامل، مثل الاعتبارات النفسية والاجتماعية والاقتصادية، والمخاوف الثقافية والدينية والصحية، وكذلك نقص المعلومات، يؤثر في قبول استخدام الحمأة. في بعض الأحيان لا يقبل السوق بشكل كبير المنتجات المعالجة فيكون تقبلها السوقي منخفض (Zhang et al., 2016). ويعتبر سوء خصائص الحمأة عقبة رئيسية أمام تدوير الكتلة الحيوية على الأراضي الزراعية، وعلى وجه التحديد المستويات العالية للمعادن الثقيلة والتي من الممكن ان تحد بشكل كامل التطبيق الامن للحماة على الأراضي الزراعية (Feng et al., 2018). يعد التخلص من مياه الصرف الصناعي في شبكة الصرف الصحي العامة سبباً هاما للمحتوى العالي للمعادن الثقيلة في الحمأة. أن الرائحة الكريهة للحمأة قد تقلل من قبول الجمهور لخيارات تطبيق الحمأة على الاراضي. لذلك، تحتاج جميع أنظمة إدارة الحمأة الى اعتبار ان انبعاث الروائح الكريهة مشكلة محتملة (Polprasert and Koottatep, 2017).

كما يساهم الافتقار إلى المعايير الوطنية والمتطلبات الفنية الإلزامية للتخلص من الحمأة في انخفاض معدلات إعادة تدوير المواد الصلبة الحيوية (Lu, 2019). قد تفشل مشاريع إعادة الاستخدام، حتى تلك التي تم

تصميمها بشكل جيد من الناحية الفنية والمالية، إذا لم يأخذ المخططون في الاعتبار بشكل كافٍ ديناميكيات القبول المجتمعي (Drechsel et al., 2015).

في مجتمعين زراعيين في الضفة الغربية في فلسطين، وهما قريتي عنزة وبيت دجن، قام رشيد وآخرون (2017) بدراسة تصورات المزارعين حول استخدام الأراضي لحمأة الصرف الصحي المعالجة. عندما سئلوا عن العوامل التي ستؤثر على ما إذا كانوا سيقررون استخدام حمأة الصرف الصحي المعالجة في مزارعهم أم لا، اختار 38% من المزارعين "قبول المستهلكين لشراء المحاصيل المخصبة بالحمأة"، واختار 22% "سعر الحمأة"، واختار 16% "الحمأة مستوفية لاشتراطات الصحة العامة"، واختار 4% "لأسباب دينية". وقال الـ 20% المتبقين من المزارعين أن المتغيرات الأربعة المذكورة أعلاه عند اتخاذ القرار تؤثر عليهم. وفي هذه الدراسة، يعتقد 45% من المزارعين أن تطبيق الحمأة المعالجة على الأرض يجب أن يتم بطريقة تحمي البيئة والاقتصاد وصحة الإنسان.

5. الإطار التنظيمي

5.1 القوانين واللوائح والمعايير المعتمدة

بالتزامن مع الاتجاه نحو الاستخدام المفيد للمواد الصلبة في مياه الصرف الصحي مقارنة بالتخلص منها، فإن تصميم أي مشروع للحمأة أو المواد الصلبة الحيوية يجب أن يأخذ في الاعتبار جودة الحمأة التي سيتم التخلص منها واللوائح السائدة (Vesilind, 2003).

في معظم الحالات، يخضع اختيار معالجة الحمأة والتخلص من الكتلة الحيوية الى لوائح التخلص (disposal regulations). على سبيل المثال، اللائحة التي تحكم التخلص من الحمأة في الولايات المتحدة هي اللوائح 40 CFR 503 الصادرة عن وكالة حماية البيئة الأمريكية (US EPA) (انظر القسم 7.2).

في فلسطين، يسمح باستخدام الحمأة للأغراض الزراعية. ويتم تنظيم العملية، بالإضافة إلى قانون البيئة الفلسطيني، في وثيقتين رئيسيتين (1) التعليمات الفنية الإلزامية رقم 59 لسنة 2015 ومعايير "استخدام الحمأة المعالجة والتخلص من الحمأة". تحدد اللوائح الفلسطينية قيم الحد الأقصى لتركيز المعادن الثقيلة في التربة والحمأة والحدود القصوى للحمأة المطبقة على الأراضي الزراعية على أساس المعدل السنوي. وبحسب الأنظمة الفلسطينية، يمكن تطبيق الحمأة المعالجة على الأراضي الزراعية المزروعة بالأشجار المثمرة، والمحاصيل الحقلية والمراعي، ولا يسمح باستخدام الحمأة المعالجة لتخصيب الأراضي المزروعة بالخضار، وكذلك المتنزهات والحدائق المنزلية والمساحات الخضراء بالقرب من التجمعات السكنية والمواقع التي يرتادها الجمهور. كما لا يسمح باستخدام الحمأة في تسميد الأراضي المزروعة بالمحاصيل الجذرية مثل الفجل والجزر والبطاطس وغيرها، سواء تم تناولها نيئة أو مطبوخة (MoA and PWA, 2015; PSI, 2010; EQA, 2000).

وفقا للمواصفة القياسية الأردنية (JS 1145-2006)، يتم تصنيف الحمأة إلى ثلاثة أنواع (أي الأنواع الأول والثاني والثالث) على أساس محتوى المعادن الثقيلة ومستوى المعالجة اللازمة لتقليل محتوى مسببات الأمراض. يمكن استخدام كلا النوعين الأول والثاني من الحمأة في الزراعة (أي كتعديل للتربة)؛ ومع ذلك، لا يمكن استخدام النوع الثاني إلا لتعديل التربة أثناء إعداد الأرض في المناطق التي لا يمكن للجمهور الوصول إليها (أي الحدائق العامة). يُسمح بدفن الحمأة من النوع الثالث، بالإضافة إلى الحمأة من النوع الأول والثاني (JS, 2006).

5.2 أدوار أصحاب المصلحة

ويشارك العديد من أصحاب المصلحة على مختلف المستويات في إدارة مرافق الصرف الصحي. يشمل أصحاب المصلحة كيانات متعددة على المستوى الوطني. عادة ما تكون سلطات المياه هي الهيئات الوطنية المسؤولة عن السياسات والتخطيط ومراقبة تقديم الخدمات المتعلقة بالمياه بما في ذلك مراقبة جودة مياه الصرف الصحي المعالجة (المياه الخارجة من محطة المعالجة). وقد يكونون أيضًا مسؤولين عن التطوير المستقبلي للمحطة، بناءً على ملكية محطة معالجة مياه الصرف الصحي، حيث تكون البلديات في بعض الحالات هي المالكة لمحطة معالجة مياه الصرف الصحي. يشمل أصحاب المصلحة أيضًا المشغلين اليومي لمحطة معالجة

مياه الصرف الصحي. بينما تقع غالبا القضايا المتعلقة بمياه الري الزراعي واستخدام الكتلة الحيوية في الزراعة ضمن مسؤوليات وزارات الزراعة، التي تصدر تراخيص للسماح للمزارعين باستخدام المياه المعاد تدويرها والكتلة الحيوية الناتجة من محطات معالجة مياه الصرف الصحي. كما تقوم بمراقبة جودة الكتلة الحيوية المستخدمة للأراضي الزراعية، بينما يتم مراقبة جودة المحاصيل المسوقة التي يتم إنتاجها بواسطة وزارات الصحة والاقتصاد الوطني. يعد المزارعون واتحادات المزارعين من أصحاب المصلحة الرئيسيين في استخدام الحمأة المعالجة، وكذلك المستهلكين. ولكن طبيعة الأدوار وتوزيع المسؤوليات والعلاقات بين مختلف أصحاب المصلحة قد تختلف من بلد الى آخر.

6. التأثير البيئي

6.1 بنية التربة ونوعيتها

عند إضافة الكتلة الحيوية إلى التربة، فأنها تشكل مصدرا للمغذيات النباتية ومُعدِّل مفيد لخواص التربة. توفر الحمأة المطبقة على الأرض مادة عضوية لتحسين بنية التربة (زيادة التهوية والقدرة على الاحتفاظ بالمياه)، والمغذيات النباتية الرئيسية (N، P، K)، والمغذيات النباتية الدقيقة (Cu، Fe، Zn). خصائص التربة التي يتم تطبيق الكتلة الحيوية عليها، وأنواع النباتات التي سيتم زراعتها، ومكونات الكتلة الحيوية، جميع تلك العوامل تؤثر على مدى فعالية الكتلة الحيوية في تحسين خواص التربة.

يمكن للمواد العضوية الموجودة في الحمأة تحسين الخواص الفيزيائية للتربة، أي قدرة التربة على امتصاص الرطوبة وتخزينها (EC, 2001; Sripanomtanakorn and Polprasert 2001; U.S. EPA, 2023). مع مرور الوقت، يمكن أن يؤدي استخدام الأراضي الزراعية إلى استنفاد المواد العضوية في التربة. ونظرًا لأن الحمأة يمكنها تجديد المواد العضوية في التربة وإضافة العناصر الغذائية إليها جزئيًا على الأقل، فإن استخدام الحمأة يمكن أن يقلل من تكاليف إنتاج المحاصيل. تعد حمأة مياه الصرف الصحي المعالجة أقل تكلفة بكثير من الأسمدة المصنعة في مصنع كيماويات. وفي المجتمعات الزراعية الأوروبية، يتم استخدام أكثر من 30% من حمأة الصرف الصحي كسماد (Wang et al., 2008). أدت الجوانب الإيجابية للحمأة كسماد وكمُعَدِّ لخواص التربة إلى زيادة الطلب على الحمأة (Pritchard et al., 2010).

6.2 تأثير استخدام الحمأة على مصادر المياه

يعد تلوث إمدادات المياه بالمعادن الثقيلة والمواد الكيميائية النيتروجينية ومسببات الأمراض من بين القضايا الرئيسية المتعلقة بتطبيق الحمأة على الأرض. اللوائح التي تضع قيودًا على معدلات الاستخدام وتركيزات مسببات الأمراض والمعادن الثقيلة تُقَيِّد الملوثات. ينصب التركيز بخصوص معدلات استخدام الحمأة في الزراعة في المقام الأول على العناصر الغذائية اللازمة للمحاصيل أكثر من تركيزها على المعادن الثقيلة وذلك في البلدان التي لديها أنظمة صرف صحي منفصلة وحيث تتم معالجة التصريفات الصناعية في نظام الصرف الصحي بشكل مناسب أو عزلها عن المجاري البلدية. لمنع التخثث (eutrophication) الكبير للمياه السطحية والموارد المائية، تعتبر قيود N أو P حاسمة.

وعلى وجه الخصوص، يمكن للنيتروجين أن يلوث طبقات المياه الجوفية الضحلة عندما يتخلل طبقات التربة. ووفقا للتقارير، فإن معدلات استخدام الأسمدة المفرطة في الزراعة هي المسؤولة عن ارتفاع مستويات النترات. من الصعب تحديد معدلات تطبيق الحمأة المناسبة على الأرض بناءً على معدل امتصاص المحاصيل للعناصر الغذائية. وينبغي على المزارعين او من له علاقة أن يأخذوا في الاعتبار مدى اختلاف معدلات امتصاص العناصر الغذائية حسب الموسم والأنواع المزروعة وكمية النيتروجين العضوي التي يتم تمعدنها (mineralized).

وفي الواقع، فإن الأنشطة الزراعية تتطلب عناصر غذائية، سواء على شكل مغذيات تجارية أو مواد صلبة حيوية أو غيرها، وبالتالي من المحتمل ان تلوث مصادر المياه بالعناصر الغذائية بطريقة لا ترتبط حرفيا بتطبيق الحمأة على الأراضي الزراعية.

6.3 استخدام الحمأة مقابل تغير المناخ

يؤدي ارتفاع الطلب على الطاقة والانبعاثات المباشرة في محطات معالجة مياه الصرف الصحي إلى انبعاثات كبيرة من غازات الدفيئة. على سبيل المثال، يمثل استهلاك الكهرباء بواسطة محطات معالجة مياه الصرف الصحي في الصين حوالي 1% من استهلاك الكهرباء الوطني (Zhang et al., 2021)، حيث تتراوح كثافة غازات الدفيئة في محطات معالجة مياه الصرف الصحي بالنسبة لأنظمة المعالجة المختلفة من 0.268 إلى 0.738 كجم من مكافئ ثاني أكسيد الكربون/ م3. يؤدي التطور السريع لمحطات معالجة مياه الصرف الصحي أيضًا إلى زيادة حادة في توليد حمأة مياه الصرف الصحي (Lu et al., 2019; Zhang et al., 2017). وفقًا للدراسات المنشورة، تساهم إدارة الحمأة بحوالي 50% من إجمالي غازات الدفيئة الناتجة عن محطات معالجة مياه الصرف الصحي (Zhao et al., 2022). وفقًا لأهداف المعالجة المختلفة، هناك العديد من تقنيات معالجة الحمأة، والتي تستخدم للتخلص البسيط أو لغرض تثمينها (من حيث المغذيات والطاقة) (Ding et al., 2021). يعد طمر النفايات التكنولوجيا الأكثر استخدامًا على نطاق واسع نظرًا لبساطتها وانخفاض تكلفة تشغيلها (Xiao et al., 2021). ومع المعايير البيئية الأكثر صرامة وسياسات إدارة النفايات في العديد من الدول كالصين مثلا، مثل "المدن الخالية من النفايات"، من المتوقع أن يتم تقييد حمأة مدافن النفايات في المستقبل القريب. يمكن لأنظمة معالجة الحمأة الأكثر كفاءة أن تحسن الكفاءة البيئية لمحطات معالجة مياه الصرف الصحي من خلال استعادة الموارد وبالتالي بالمقابل تعويض الآثار البيئية لمحطات المعالجة، مثل انبعاثات الغازات الدفيئة (Ding et al., 2021).

تم بحث دورة حياة انبعاثات الغازات الدفيئة الناتجة عن معالجة طن واحد من الحمأة الجافة بأنظمة معالجة مختلفة بواسطة تشن وآخرون (Chen et al., 2022). معظم أنظمة معالجة الحمأة، بما في ذلك تثمين المواد، والتخلص التقليدي، واستعادة المغذيات، واستعادة الطاقة لها قيم إيجابية في انبعاثات غازات الدفيئة. بالنسبة لمجموعة الذبال (composting group)، وحيث انه يمكن استرداد النيتروجين والفوسفور الموجود في الحمأة كسماد، مما يمكن أن يحسن كفاءة استخدام الموارد وتجنب إنتاج الأسمدة التجارية المصنعة فانه يمكن لانبعاثات الغازات الدفيئة (خاصة الميثان وأكسيد النيتروز) الناتجة أثناء عملية تصنيع الذبال أن تُعوّض برصيد الكربون الناتج عن استبدال الأسمدة (Piippo et al., 2018; Righi et al., 2013). في الواقع، فإن استخدام الكتلة الحيوية كمصدر تكميلي للنيتروجين له تأثير إيجابي على الحد من غازات الدفيئة عن طريق الحد من استخدام الأسمدة التجارية التي تؤدي الى انتاج كمية كبيرة من غاز ثاني أكسيد الكربون.

يتراوح إجمالي انبعاثات الغازات الدفيئة الناتجة عن تحويل الحمأة إلى ذبال (sludge composting) بشكل أساسي من 0 إلى 1 طن من ثاني أكسيد الكربون لكل طن من الحمأة الجافة المعالجة. بالنسبة لمجموعة التخلص التقليدي وتثمين المواد، قد تحقق بعض الأنظمة تأثيرًا مخففًا لغازات الدفيئة. تعتمد الطريقة الأكثر استدامة لمعالجة حمأة الصرف الصحي بشكل كبير على الوضع والظروف المحلية، مثل الكثافة السكانية ودرجة الحرارة ومسافة النقل (Piippo et al., 2018). على سبيل المثال، ريغي وآخرون. (2013) أفاد أن الهضم اللاهوائي المشترك لحمأة مياه الصرف الصحي التي تم نزح المياه منها (dewatered) والجزء العضوي من النفايات الصلبة البلدية (OFMSW) في محطات المعالجة الصغيرة بالإضافة إلى عملية انتاج الذبال (composting) بعد المعالجة اللاهوائية قد يوفر خيارًا مستدامًا بيئيًا لإدارة النفايات في المجتمعات الصغيرة. يتم تحقيق ذلك من خلال (1) تقليل كبير في المسافات والأحجام المنقولة عن طريق البر، (2) انخفاض متطلبات الطاقة للعملية نفسها، (3) توفير الطاقة من وحدة CHP و(4) توفير الطاقة/الموارد من الذبال المنتج بواسطة المادة المهضومة لاهوائيا.

لا يجوز استخدام الكتلة الحيوية إذا كان من المحتمل أن تؤثر سلبًا على الأنواع المهددة أو المعلرضة للانقراض (Vesilind, 2003).

7. الجوانب الصحية

7.1 الجوانب الصحية

وأهم خاصيتين للحمأة التي تحد من استخدامها هما المعادن الثقيلة ومسببات الأمراض. وبسبب القلق المستمر حول التخلص من الحمأة، يصر العديد من المزارعين على قبول الحمأة من الفئة أ فقط (Vesilind، 2003).

يتم غالبا تطبيق الكتلة الحيوية على الأراضي الزراعية والغابات ومواقع الاستصلاح على شكل سائل أو كعكة منزوعة الماء. كحد أدنى، يجب ان تحقق مواصفات هذه المواد متطلبات الحد الأعلى لتركيزات الملوثات (pollutant ceiling concentrations) ، ومتطلبات تقليل مسببات الأمراض للفئة ب، ومتطلبات تقليل جذب ناقلات الأمراض، ويجب تطبيقها باستخدام معدلات تحميل الملوثات التراكمية إذا لم تستوف حدود تركيز الملوثات.

يمكن أن تسبب حمأة الصرف الصحي المطبقة على المناطق الزراعية مخاطر بيئية وصحية سلبية. ويرتبط هذا بشكل أساسي بتراكم المعادن الثقيلة السامة مثل الزنك والنحاس والكروم والكادميوم والرصاص في التربة التي تصل إلى النباتات الغذائية (Martinez and Motto, 2020).

في دراسة لتطبيق الحمأة على الأراضي في بانكوك، تايلاند، باسدا وآخرون (2005) ذكروا وجود معادن ثقيلة وبكتيريا القولون البرازية في الحمأة. واقترحوا أن يتم تسخين الحمأة عن طريق التسميد (composting) لتقليل عدد الكائنات الحية المسببة للأمراض (Pasda et al., 2005) .

7.2 المعايير والمبادئ التوجيهية الدولية بشأن إعادة الاستخدام الآمن للحمأة

في الولايات المتحدة، تم إصدار اللوائح (40 CFR الجزء 503) في عام 1993 من قبل وكالة حماية البيئة الأمريكية التي وضعت حدودًا رقمية للملوثات وممارسات إدارية لإعادة استخدام المواد الصلبة الناتجة عن معالجة مياه الصرف الصحي البلدية والتخلص منها. تم تصميم اللوائح لحماية الصحة العامة والبيئة من الآثار الضارة المتوقعة بشكل معقول للملوثات الموجودة في المواد الصلبة الحيوية.

تضمنت اللوائح التي يتناولها الجزء 40 من قانون اللوائح الاتحادية الجزء 503 تطبيق الكتلة الحيوية على الأرض. يتعلق تطبيق الكتلة الحيوية على الأراضي بإعادة استخدامها ويشمل جميع أشكال تطبيقها كشحنة غير معبئة أو معبأة في أكياس على الأرض لاستخدامات مفيدة حسب معدلات زراعية، أي معدلات مصممة لتوفير كمية النيتروجين اللازمة للمحاصيل أو النباتات مع تقليل الكمية التي تمر أسفل منطقة الجذور. حددت اللوائح (1) مستويين من جودة المواد الصلبة الحيوية فيما يتعلق بتركيزات المعادن الثقيلة –الحد الأعلى للملوثات وتركيزات الملوثات (الكتلة الحيوية "عالية الجودة")؛ (2) مستويين من الجودة فيما يتعلق بكثافة مسببات الأمراض - الفئة (أ) والفئة (ب)؛ و(3) نوعان من الأساليب لتلبية جاذبية ناقلات الأمراض - معالجة الكتلة الحيوية أو استخدام الحواجز المادية. يؤدي تقليل جذب النواقل إلى تقليل احتمالية انتشار الأمراض المعدية بواسطة نواقل مثل القوارض والحشرات والطيور.

تقسم لوائح 40 CFR الجزء 503 جودة المواد الصلبة الحيوية إلى فئتين، يشار إليهما بالفئة A والفئة B. تحتاج المواد الصلبة الحيوية من الفئة A إلى تلبية معايير محددة

لضمان أنها آمنة للاستخدام من قبل الجمهور والمشاتل والحدائق، ملاعب الجولف. تتطلب المواد الصلبة الحيوية من الفئة ب متطلبات معالجة أقل من الفئة أ، وعادةً ما تُستخدم للتطبيق على الأراضي الزراعية أو يتم التخلص منها في مكب النفايات.

عندما يتم إعداد الكتلة الحيوية للبيع أو وهبها لاستخدامها في الأراضي في المروج (lawns) والحدائق المنزلية أو يتم تسويقها في حاويات، يجب أن تستوفي الكتلة الحيوية من الفئة "أ" أحد المعايير التالية:

1. كثافة القولونيات البرازية أقل من 1000 رقم محتمل (MPN)/ جرام من إجمالي المواد الصلبة الجافة، أو
2. السالمونيلا sp. كثافة أقل من 3 MPN لكل 4 جم من إجمالي المواد الصلبة الجافة.

بالإضافة إلى ذلك، من الضروري تلبية متطلبات أحد بدائل الحد من مسببات الأمراض التالية (Vesilind, 2003; Metcalf and Eddy, 2003):

- الكتلة الحيوية المعالجة حرارياً: استخدم أحد أنظمة درجات الحرارة الأربعة. يجب الحفاظ على درجة حرارة مرتفعة لفترة محددة حسب الإرشادات المذكورة في الجدول 5.
- المعالجة القلوية: الكتلة الحيوية المعالجة في عملية ذات رقم هيدروجيني عالي ودرجة حرارة عالية؛ رقم هيدروجيني ودرجة الحرارة ومتطلبات تجفيف بالهواء محددة (الرقم الهيدروجيني> 12 لمدة 72 ساعة على الأقل؛ خلال هذا الوقت، يجب أن تكون درجة حرارة المواد الصلبة الحيوية أكبر من 52 درجة مئوية لمدة 12 ساعة على الأقل؛ وبعد فترة ال 72 ساعة، يجب أن يتم تجفيف الكتلة الحيوية بالهواء لمدة 12 ساعة على الأقل).
- بالنسبة للكتلة الحيوية المعالجة بعمليات أخرى: إثبات أن العملية يمكن أن تقلل من الفيروسات المعوية وبويضات الديدان الطفيلية القابلة للحياة. الحفاظ على ظروف التشغيل المستخدمة في العرض التوضيحي.
- الكتلة الحيوية المعالجة بعمليات غير معروفة: لا داعي لتوضيح العملية. بدلاً من ذلك، يتم اختبار مسببات الأمراض – Salmonella sp. البكتيريا والفيروسات المعوية وبويضات الديدان الطفيلية القابلة للحياة -في وقت استخدام الكتلة الحيوية أو التخلص منها أو تحضيرها للبيع أو الهبة في كيس أو حاوية أخرى لتطبيقها على الأرض، أو عند إعدادها للوفاء بالمتطلبات الواردة في 503.10 (e)، (c)، (b). أو (f)
- تمت معالجة المواد الصلبة الحيوية من خلال عمليات لإزالة مسببات الأمراض أو عمليات مماثلة، على النحو الذي تحدده سلطة الترخيص.

الجدول 5. أنظمة درجة الحرارة-الزمن الأربعة لتخفيض مسببات الأمراض للفئة A بموجب البديل 1 (Vesilind, 2003)

Total solids	Temperature (t)	Time (d)	Equation	Notes
≥%7	≥° 50C	≥20 min	$D = \frac{131,700,000}{10^{0.14t}}$	No heating of small particles by warmed gases or immersible liquid
≥%7	≥° 50C	>15 sec	$D = \frac{131,700,000}{10^{0.14t}}$	Small particles heated by warmed gases or immersible liquid
<%7	>° 50C	≥15 sec to <30 min	$D = \frac{131,700,000}{10^{0.14t}}$	
<%7	≥° 50C	≥30 min	$D = \frac{131,700,000}{10^{0.14t}}$	

لكي يتم تطبيقها على الأرض، يجب أن تحقق الكتلة الحيوية التركيزات الأعلى للملوثات (pollutant ceiling concentrations) ومعدلات تحميل الملوثات التراكمية (cumulative pollutant loading rates) أو حدود تركيز الملوثات (pollutant concentration limits). تحتاج الكتلة الحيوية غير المعبأة (bulk) المطبقة على المروج والحدائق المنزلية إلى تلبية حدود تركيز الملوثات. يجب أن تستوفي المواد الصلبة الحيوية المباعة أو الممنوحة في أكياس أو حاويات أخرى حدود تركيز الملوثات أو التركيزات الأعلى للملوثات، ويجب تطبيقها بمعدل استخدام المنتج السنوي الذي يعتمد على معدلات تحميل الملوثات السنوية. بموجب القواعد الفيدرالية 503، تنطبق بعض قيود الموقع على استخدام الفئة ب، ولكن لا يلزم الحصول على تصاريح موقع فردية لاستخدامها. تضع اللوائح الفيدرالية أيضًا معايير لتسعة ملوثات (الجدول 6). وتشمل المعايير ما يسمى بحمأة "الجودة الاستثنائية" (EQ)، والتي تلبي حدود تركيز معينة (لا تزيد عن X جزء في المليون من أي من الملوثات التسعة الخاضعة للتنظيم) بالإضافة إلى متطلبات الحد من مسببات الأمراض وناقلات الأمراض.

فيما يتعلق بتركيزات المعادن، يمكن تطبيق الحمأة ومنتجات الحمأة التي تفشل في تلبية واحد أو أكثر من تركيزات الملوثات المطلوبة لجودة "EQ" ولكنها تقع تحت التركيز الأعلى للملوث، ولكن يتم توجيه الشخص الذي يطبق الكتلة الحيوية على الأرض لتتبع الكمية الإجمالية لكل معدن ثقيل يتم تطبيقه ووقف التطبيق عند الوصول إلى الحد التنظيمي لتحميل الملوثات التراكمية. يمكن توزيع منتجات الحمأة التي تفشل في تلبية واحد أو أكثر من تركيزات الملوثات المطلوبة لتحقيق جودة "EQ" ولكنها أقل من تركيز الحد الأعلى على المنازل أو في أكياس طالما يتم توفير معلومات حول معدل تحميل الملوثات السنوي المقبول للمستخدم. في هذا السياق، هناك العديد من الأصوات في الولايات المتحدة، التي تدعم أنه على الرغم من أن المعايير قد تم تطويرها من خلال دراسات واسعة النطاق لتقييم المخاطر، إلا أن فجوات البيانات وخيارات السياسات غير الوقائية تؤدي إلى لوائح لا توفر حماية كافية لصحة الإنسان (Harrison et al., 1999; Vesilind, 2003; Doula, 2017).

الجدول 6. حدود الملوثات المستخدمة في الأراضي (أساس الوزن الجاف) في لوائح الجزء 503 من وكالة حماية البيئة الأمريكية (Doula, 2017)

Pollutant	1Pollutant concentration in EQ biosolid (mg/kg)	2Ceiling concentration in biosolids applied to land (mg/kg)	3Cumulative pollutant loading rate limits (kg/ha)	Annual pollutant loading rates, kg/ha.yr
Arsenic	41	75	41	2.0
Cadmium	39	85	39	1.9
Copper	1500	4300	1500	75
Lead	300	840	300	15
Mercury	17	57	17	0.85
Molybdenum	-	75	-	-
Nickel	420	420	420	21
Selenium	100	100	100	5.0
Zinc	2800	7500	2800	140

1: Applies to bulk biosolids & bagged biosolids;
2: Applies to all biosolids that are land-applied;
3: Applies to bulk non-EQ biosolids;
4: Applies to bagged biosolids not meeting EQ limits.

يضم الاتحاد الأوروبي (EU27 دولة عضو مستقلة. ويتعين على الدول الأعضاء في الاتحاد الاوروبي سن لوائح وتوجيهات الاتحاد الأوروبي في تشريعاتها الوطنية. توجيهات إدارة الحمأة: خلال الثلاثين عامًا الماضية، تم تنظيم إدارة الحمأة في دول الاتحاد الأوروبي، بشكل مباشر وغير مباشر من خلال الأدوات التشريعية والقوانين والتوجيهات. من بينها، التوجيه EEC/86/278 (الذي تم اعتماده في عام 1986) والتوجيه 91/271/ EEC (الذي تم اعتماده في عام 1991) لهما التأثير الأكثر أهمية. يحدد التوجيه EEC/86/278 قواعد حول كيفية استخدام المزارعين لحمأة الصرف الصحي كسماد لمنعها من الإضرار بالتربة والنباتات والحيوانات وصحة الإنسان دون المساس بجودة التربة أو المياه السطحية والمياه الجوفية. فهو يضع حدودًا محددة لتركيزات سبعة معادن ثقيلة مسموح بها في التربة والتي قد تكون سامة للنباتات والبشر. منذ اعتماد هذا التوجيه، قامت العديد من الدول الأعضاء بسن وتنفيذ قيم حدودية أكثر صرامة للمعادن الثقيلة والملوثات الأخرى (European Communities Commission 1986). نظرًا لتنفيذ التوجيه EEC/91/271، والمعروف باسم توجيه معالجة مياه الصرف الصحي في المناطق الحضرية، زادت كمية الحمأة التي تتطلب التخلص منها وتحسنت جودة الحمأة بشكل كبير في دول الاتحاد الأوروبي الخمسة عشر خلال الفترة 2000-2010. يحظر هذا التوجيه التخلص من الحمأة في البحر (بحلول 31 ديسمبر 1998)، مما يؤدي إلى خيارين لإدارة الحمأة، أو إعادة تدويرها إلى الأراضي الزراعية أو التخلص منها في مكب النفايات (Inglezakis et al., 2011a, b).

8. إدارة تطبيق الكتلة الحيوية على الأراضي الزراعية

8.1 العناصر الغذائية المتوفرة في الكتلة الحيوية للنباتات

توفر حمأة الصرف الصحي عند وضعها على التربة مصدرًا للمغذيات النباتية وهي محسن فعّال للتربة، وتوفر الحمأة المطبقة على الأرض العناصر الغذائية النباتية الرئيسية مثل N، P، K؛ المغذيات النباتية الدقيقة مثل Cu وFe و Zn؛ والمواد العضوية لتحسين بنية التربة (مثل تحسين التهوية والقدرة على الاحتفاظ بالمياه). تشمل بعض القيود في استخدام الحمأة كسماد عدم ثبات محتوى العناصر الغذائية، ومستويات N وP وK حوالي خُمس تلك الموجودة في الأسمدة الكيميائية النموذجية. يوجد الكثير من النيتروجين والفوسفور الموجود في الحمأة في تركيبة عضوية يجب تمعدنها قبل أن تصبح متاحة للنباتات. يعتمد معدل تمعدن النيتروجين والفوسفور في التربة على الظروف المحلية مثل نوع التربة ودرجة الحرارة ودرجة حموضة التربة ومياه التربة وغيرها من الخصائص الكيميائية والفيزيائية للتربة (Polprasert and Koottatep, 2017).

يوضح الجدول 7 القيم الغذائية النموذجية للكتلة الحيوية لمياه الصرف الصحي مقارنة بالأسمدة التجارية. ويعتبر استخدام الحمأة مكملاً أو بديلاً للأسمدة التجارية. في معظم أنظمة تطبيق الكتلة الحيوية على الأراضي، توفر الكتلة الحيوية العناصر الغذائية الكافية لنمو النبات بشكل جيد. وفي بعض أنظمة تطبيق الأراضي، قد يكون محتوى الفوسفور والبوتاسيوم منخفضًا ويتطلب تعديلات (Metcalf and Eddy, 2003).

على الرغم من الاستخدام المتزايد لحمأة الصرف الصحي، إلا أن هناك عيوبًا كبيرة، كما يلي: (أ) احتمال وجود معادن ثقيلة، وملوثات عضوية، ومسببات الأمراض، والتي يمكن أن تتراكم في الحمأة (Wang 1997)؛ و (ب) الروائح الكريهة الناتجة عن الحمأة. وتطرح هذه العيوب قضايا تتعلق بالصحة العامة والبيئة (الأكاديمية الوطنية للعلوم 1996). ومع ذلك، يمكن التقليل من هذه العيوب عن طريق اختيار المحاصيل المناسبة، واعتماد تقنيات مناسبة لنشر الحمأة، وتنظيم الوقت بين تطبيقات الحمأة والحصاد (Dahlstrom 2005).

الجدول 7. مقارنة مستويات المغذيات في الأسمدة التجارية والكتلة الحيوية الناتجة من مياه الصرف الصحي(أ)

Product	Nutrients, %		
	Nitrogen	Phosphorous	Potassium
Fertilizers for typical agricultural use a	5	10	10
Typical values for stabilized wastewater biosolids (based on TS)	3.3	2.3	0.3

a The concentrations of nutrients may vary widely depending upon the soil crop needs
Source: Metcalf and Eddy (2003)

8.2 النقل والتخزين

يوضح الجدول 8 الطرق المختلفة للتعامل مع الحمأة ونقلها من المصدر إلى موقع التطبيق على الأرض/التخلص. يمكن أن يتم النقل عن طريق خط الأنابيب (تدفق بالجاذبية أو الضغط)، أو شاحنة الصهريج، البارجة، أو السكك الحديدية الناقلة. تعد خصائص الحمأة (مثل المحتويات الصلبة)، وحجم الحمأة، واختلافات الارتفاع، ومسافة النقل، وتوافر الأرض من العوامل المهمة في اختيار طريقة نقل الحمأة. الحمأة السائلة (1-10% محتويات صلبة) مناسبة بشكل عام لأي وسيلة من وسائل نقل الحمأة، في حين يجب نقل الحمأة شبه الصلبة أو الصلبة، التي تحتوي على نسبة عالية من الصلابة (8-80%)، فقط عن طريق الشاحنات أو عربات السكك الحديدية. تُستخدم شاحنات الصهاريج حاليًا على نطاق واسع لنقل الحمأة وتطبيقها على الأرض لأنها توفر المرونة في اختيار مواقع تطبيق الأرض. عادة، يتم توفير مرفق تخزين للحمأة في موقع التطبيق على الأرض.

الجدول 8. محتوى الحمأة من المواد الصلبة وخصائص التعامل معها

Type	Solid contents (%)	Handling methods
Liquid	1-10	Gravity flow, pump, tank support
Semi-solid ('wet' solid)	8-30	Conveyor, auger, truck transport (water tight box)
Solid ('dry' solid)	25-80	Conveyor, bucket, truck transport

Knezek and Miller 1978 reported in Polprasert and Koottatep (2017)

8.3 أفضل ممارسة

طرح ماتيو ساجاستا وآخرون (2022) الحجة القائلة بأن الشخص الذي عارض سابقًا فكرة استخدام مياه الصرف الصحي المعالجة قد يغير رأيه إذا دعم شخص لديه قيم ثقافية مماثلة لإعادة الاستخدام (Mateo-Sagasta et al., 2022)). الممارسة الجيدة هي دراسة حالة في الواقع الحقيقي تُظهر باستمرار نتائج متفوقة على المناهج المنافسة (Mannina et al., 2022). يعد إنشاء مواقع توضيحية لاستخدام الكتلة الحيوية في الزراعة أداة مفيدة للغاية لتحفيز قبول المزارعين لإعادة تدوير النفايات.

وفقا لريغي وآخرون (2013)، قد توفر عملية الهضم اللاهوائي المشترك لحمأة مياه الصرف الصحي المنزوعة الماء والجزء العضوي للنفايات الصلبة المنزلية في محطات المعالجة الصغيرة بالإضافة الى عملية التسميد بعد المعالجة (co-composting) خيارًا مستدامًا بيئيًا لإدارة النفايات. ويمكن أن تشمل الفوائد الاجتماعية تحسين القبول العام لمرافق معالجة النفايات وزيادة الوعي العام بمسألة إدارة النفايات (Righi et al., 2013).

8.4 تنمية القدرات

ووفقا للوائح، يتعين على المزارعين التعرف على كمية العناصر الغذائية في الحمأة، وتسجيل كمية الحمأة المضافة إلى أراضيهم، وكمية المعادن الثقيلة. من الضروري أن يكون المزارعون على دراية بالعناصر الغذائية التي تطلبها محاصيلهم النامية. ويجب أن يكون المزارعون قادرين على تحديد الكميات اللازمة في حالة إضافة أسمدة كيماوية إضافية بالإضافة إلى المواد الصلبة الحيوية. يُنصح بإجراء حملات توعية لتثقيف وتدريب المزارعين على الاستخدام الآمن والفعال للحمأة من أجل تشجيع استخدام الحمأة في الأراضي.

وينبغي أن تشمل أنشطة بناء القدرات أيضًا أصحاب المصلحة الآخرين، وتحديدًا خدمات الإرشاد وصناع القرار، وما إلى ذلك. من الجدير بالاعتبار، وضع رؤية واسعة لبناء القدرات كبرنامج تشاركي شامل يشمل المزارعين والقطاع الخاص وموظفي الوزارات التنفيذية (الزراعة، المياه، البيئة، الصحة، التخطيط.

8.5 دور البحث والتطوير

في حالة استخدام عمليات أخرى لمعالجة الحمأة لتلبية متطلبات الفئة أ، بخلاف تلك المذكورة في القسم 7.1، فمن الضروري مراقبة الفيروسات المعوية وبويضات الديدان الطفيلية القابلة للحياة لإثبات أن النتائج متوافقة مع القيم أو نطاقات من القيم موثقة طوال الوقت. على سبيل المثال، نوعية الحمأة المجففة بواسطة احواض التجفيف في البلدان ذات المناخ الحار، أو البلدان، أو المناطق داخل نفس البلد، مع اختلاف موسمي أو جغرافي كبير في درجات الحرارة، كما هو الحال على سبيل المثال في أريحا/ فلسطين حيث تكون شديدة الحرارة في الصيف وأكثر حرارة من باقي مناطق الضفة الغربية.

ومن المهم إجراء استطلاعات الرأي حول القبول الاجتماعي للمنتجات الزراعية المسمّدة (fertilized) بالكتلة الحيوية. ينبغي إتاحة البيانات المتعلقة بإنتاجية المحاصيل، وكمية المواد الصلبة الحيوية المستخدمة، وكمية الأسمدة الكيماوية المستخدمة، والتحليل الاقتصادي، ونوعية التربة، والتحقيق في كيفية تأثير هذه الجوانب على قبول المزارعين لاستخدام الكتلة الحيوية وذلك للمزارع التي تتلقى الكتلة الحيوية. من أجل فهم عميق لمخاطر الملوثات المثيرة للقلق (contaminants of emergent concern (CEC)) الموجودة في مياه الصرف الصحي، من المهم أيضًا تحديد كمية الملوثات المثيرة للقلق وتحديدها في التربة والمحاصيل (Garduño-Jiménez et al., 2023). ينبغي تنفيذ التأثيرات البيئية لدورة الحياة لاستخدام الكتلة الحيوية. وينبغي رصد التأثيرات المحتملة للحمأة على الأراضي الزراعية والبيئة بشكل مستمر عن طريق إجراء الاختبارات المعملية. من المهم إجراء البحوث للتعامل مع مخاوف المزارعين بشأن استخدام الحمأة في الأراضي، قبل وبعد تطبيق الحمأة على أراضيهم الزراعية. ويحتاج المزارعون وعامة الناس إلى إتاحة وصولهم إلى المعلومات، وينبغي إبلاغهم بنتائج البحوث.

ومن الضروري أن يقوم صناع القرار بإدراج موضوع تطبيق الكتلة الحيوية على الأراضي الزراعية ضمن الأولويات البحثية الوطنية. تحتاج مشاريع تطبيق الكتلة الحيوية على الأراضي إلى مكونات بحثية لضمان الفائدة الاجتماعية والاقتصادية والبيئية المثلى، ولتوثيق الدروس المستفادة. أن تمويل البحوث، من أجل الربط بين البحث العلمي وتقديم الخدمات أمرًا بالغ الأهمية للتخفيف من التحديات والحصول على مزيد من البصيرة في التطبيق المستدام للكتلة الحيوية على الأراضي.

9. الاستنتاجات والتوجيهات المحتملة

9.1 الاستنتاجات

توضح هذه الدراسة أن تطبيق الحمأة المعالجة، والمعروفة أيضًا باسم الكتلة الحيوية، يعد خيارًا معقولًا وجذابًا للغاية لإدارة الحمأة على المدى الطويل. ويرجع ذلك إلى حقيقة أن تطبيق الحمأة المعالجة على الأرض (1) يوفر خيارًا نهائيًا للتخلص من الكمية المتزايدة باستمرار من الحمأة المنتجة كمنتج ثانوي للنفايات من محطات معالجة مياه الصرف الصحي، و (2) يعيد تدوير العناصر الغذائية والمواد العضوية التي هي مفيدة جدًا للأراضي الزراعية، حيث تزيد من إنتاجية الأراضي الزراعية وتقلل من تكلفة الأسمدة التجارية، وكلاهما مفيد للبيئة. يعمل محتوى النيتروجين في الحمأة المعالجة كمصدر تكميلي للنيتروجين للمحاصيل، مما يقلل من الحاجة إلى الأسمدة الكيماوية كثيفة الاستخدام للطاقة من خلال استعادة الموارد وتقليل التأثير البيئي لانبعاثات غازات الدفيئة عن طريق تقليل استخدام الأسمدة النيتروجينية التجارية والتي يؤدي انتاجها الى انبعاث كميات كبيرة من غاز ثاني أكسيد الكربون.

من الضروري معالجة الحمأة في محطة معالجة مياه الصرف الصحي باستخدام التقنيات والعمليات المناسبة لتحقيق جودة الحمأة المطلوبة. وكذلك من الضروري أن يكون لدى كل دولة متطلبات ومعايير فنية إلزامية وطنية. يجب التركيز على التحكم في تصريف مياه الصرف الصناعي في نظام الصرف الصحي لضمان عدم التلوث المفرط بالمعادن الثقيلة.

على الرغم من المزايا الواضحة لتطبيق المواد الصلبة الحيوية على الأراضي الزراعية، هناك عدد من القضايا الاجتماعية والاقتصادية والثقافية والبيئية التي تشكل عقبات أمام الاستخدام الفعال للحمأة المعالجة. يجب أن تؤخذ هذه المخاوف بعين الاعتبار قبل وأثناء وبعد تطبيق الحمأة على الأراضي الزراعية. وهذا أمر ضروري لضمان التخلص من حمأة مياه الصرف الصحي بشكل آمن وبأقل ضرر ممكن على البيئة وصحة الإنسان.

9.2 الاتجاهات الممكنة

أدناه مقترحات لتوجهات ممكنة من أجل المضي قدماً في التطبيق الناجح للحمأة المعالجة على الأرض على النحو التالي:

- مشاريع تجريبية متكاملة لتطبيق المواد الصلبة الحيوية على الأراضي الزراعية بما في ذلك الأبعاد المتعلقة بجودة المحاصيل، وجودة التربة، وتقدير كمية الحمأة وتوصيفها، والقبول الاجتماعي، والأثر البيئي، وإشراك أصحاب المصلحة.
- تُنصح السلطات بالتأكد من التحكم السليم في التصريفات الصناعية في نظام الصرف الصحي العام لضمان عدم التخلص من المواد الضارة، مثل المعادن الثقيلة.
- تنمية القدرات التي تستهدف مختلف أصحاب المصلحة، من صناع القرار إلى المزارعين، بشأن الأساليب والعمليات واللوائح والأدوات اللازمة لرصد وتقييم الاستخدام الآمن للحمأة في الزراعة.

9. المراجع

M., Wichelns, D. (eds.) Wastewater: Economic asset in an urbanizing world. Springer Dordrecht. pp.75–92. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9545-6_5.

- EC, European Commission. (2001). Disposal and recycling routes for sewage sludge. Part 1—sludge use acceptance report. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities ISBN 92-894-1798-6.
- EQA, Environmental Quality Authority. (2000). Palestinian Environmental Law, 1999.
- Fang, Y. R., Li, S., Zhang, Y., Xie, G. H. (2019). Spatio-temporal distribution of sewage sludge, its methane production potential, and a greenhouse gas emissions analysis. Journal of Cleaner Production, 238, 117895.
- Feng, J. J., Jia, L., Liu, Q. Z., Chen, X. L., Cheng, J. P. (2018). Source identification of heavy metals in sewage sludge and the effect of influent characteristics: a case study from China. Urban Water Journal, 15(4), 381-387.
- Horan, N. J. Biological wastewater treatment systems. Theory and operation. University of Leeds, UK, 1990.
- JS, Jordanian Standards. (2006). Water -
- Bittencourt, S., Serrat, M., Aisse, M., Gomes, D. (2014). Sewage sludge usage in agriculture: a case study of its destination in the Curitiba Metropolitan Region, Paraná, Brazil. Water, Air, & Soil Pollution, 225, 2074–2081.
- Chen, W., Liu, J., Zhu, B. H., Shi, M. Y., Zhao, S. Q., He, M. Z., ... Chen, Y. P. (2022). The GHG mitigation opportunity of sludge management in China. Environmental Research, 212, 113284.
- Ding, A., Zhang, R., Ngo, H. H., He, X., Ma, J., Nan, J., Li, G. (2021). Life cycle assessment of sewage sludge treatment and disposal based on nutrient and energy recovery: A review. Science of the Total Environment, 769, 144451.
- Doula, M. K., Kouloumbis, P., Sarris, A., Hliaoutakis, A., Papadopoulos, N. S., Kydonakis, A. (2017). Reuse of Sewage Sludge on Soil: Terms, Preconditions and Monitoring. In municipal solid waste management strategies, challenges and future directions, Nikolaos Tzortzakis editor. Published by Nova Science Publishers, Inc. New York.
- Drechsel, P., Mahjoub, O., Keraita, B. (2015). Social and cultural dimensions in wastewater use. In: Drechsel, P., Qadir,

of lead, zinc and copper added to mineral soils. Environmental pollution, 107(1), 153-158.

- Mateo-Sagasta, J., Al-Hamdi, M., AbuZeid, K. (Eds.) (2022). Water reuse in the Middle East and North Africa: a sourcebook. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI). 292p. doi: https://doi.org/10.5337/2022.225
- Metcalf and Eddy Inc. (2003). Wastewater Engineering Treatment and Reuse. Fourth Edition. New York: Tata McGraw-Hill.
- MoA and PWA (2015), Obligatory Technical Instructions, Treated Sludge for Agricultural Reuse. No 59 for year 2015. Ramallah, Palestine.
- Nassar, A., Tubail, K., Afifi, S. (2009). Attitudes of farmers toward sludge use in the Gaza Strip. International Journal of Environmental Technology and Management, 10(1), 89–101.
- Pasda, N., Panichsakpatana, S., Limtong, P., Oliver, R., Montage, D. (2005). Evaluation of Bangkok sewage sludge for possible agriculture use. Waste Management & Research, 24, 167–174.
- Piippo, S., Lauronen, M., Postila, H. (2018). Greenhouse gas emissions from different sewage sludge treatment methods in north. Journal of Cleaner Production, 177, 483-492.
- Polprasert, C., Koottatep, T. (2017). Organic Waste Recycling: Technology, Management and Sustainability : Technology, Management and Sustainability, IWA Publishing. ProQuest Ebook Central, http://ebookcentral.proquest.com/lib/delft/detail.action?docID=4939116.

sludge - treated sludge used and disposal. JS: 1145/2006.

- Kelessidis, A., Stasinakis, A. S. (2012). Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. Waste management, 32(6), 1186-1195.
- Keraita, B., Jiménez, B., Drechsel, P. (2008). Extent and implications of agricultural reuse of untreated, partly treated and diluted wastewater in developing countries. Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources, 3(58), 1–15.
- Knezek, B.D., Miller, R.H. (1978) Application of Sludge and Wastewater on Agricultural Land: A Planning and Education Guide, MCD-35, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- Krogmann, U., Gibson, V., Chess, C. (2000). Land application of sewage sludge: perceptions of New Jersey vegetable farmers. Waste Management & Research, 19, 115–125.
- Lu, J. Y., Wang, X. M., Liu, H. Q., Yu, H. Q., Li, W. W. (2019). Optimizing operation of municipal wastewater treatment plants in China: The remaining barriers and future implications. Environment international, 129, 273-278.
- Mannina, G., Gulhan, H., Ni, B.J. (2022). Water reuse from wastewater treatment: The transition towards circular economy in the water sector. Bioresour. Technol. 127951. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127951.
- Martınez, C. E., Motto, H. L. (2000). Solubility

of sewage sludge-derived biochar for resource recovery-A review. Chemosphere, 287, 131969.

- Yassin, M., Abd Rabou, A. (2002). Perception of sludge use among farmers in northern governorate, Gaza Strip. Bulletin of the Faculty of Agriculture, Cairo University, 53, 517– 530.
- Zhang, J., Li, N., Dai, X., Tao, W., Jenkinson, I. R., Li, Z. (2018). Enhanced dewaterability of sludge during anaerobic digestion with thermal hydrolysis pretreatment: new insights through structure evolution. Water Research, 131, 177-185.
- Zhang, Q. H., Yang, W. N., Ngo, H. H., Guo, W. S., Jin, P. K., Dzakpasu, M., ... Ao, D. (2016). Current status of urban wastewater treatment plants in China. Environment international, 92, 11-22.
- Zhao, G., Tang, J., Zhou, C., Wang, C., Mei, X., Wei, Y., Xu, J. (2022). A Megacity-Scale Analysis of Sludge Management and Carbon Footprint in China. Polish Journal of Environmental Studies, 31(3).
- Pöpel, H. J. Lecture notes on wastewater treatment. IHE, The Netherlands 1993.
- PSI (2010). Sludge- Use of treated sludge and Sludge disposal. PS: 898-2010, Ramallah, Palestine
- Raheem, A., Sikarwar, V. S., He, J., Dastyar, W., Dionysiou, D. D., Wang, W., Zhao, M. (2018). Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: A review. Chemical Engineering Journal, 337, 616-641.
- Righi, S., Oliviero, L., Pedrini, M., Buscaroli, A., Della Casa, C. (2013). Life cycle assessment of management systems for sewage sludge and food waste: centralized and decentralized approaches. Journal of Cleaner Production, 44, 8-17.
- Tezel, U., Tandukar, M., Pavlostathis, S.G. (2011). Anaerobic Biotreatment of Municipal Sewage Sludge, Editor(s): Murray Moo-Young, Comprehensive Biotechnology (Second Edition), Academic Press, Pages 447-461, ISBN 9780080885049, https://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00329-9.
- Tsang K. R., Vesilind P. A. (1990).“Moisture distribution in sludges,” Water Science and Technology, vol. 22, no. 12, pp. 135–142, 1990.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA) (2023). Biosolids. Retrieved on September 27th, 2023 from: https://www.epa.gov/biosolids
- Veenstra, S. Lecture notes on sludge management. IHE 2002 (LN0079/02/1).
- Xiao, Y., Raheem, A., Ding, L., Chen, W. H., Chen, X., Wang, F., Lin, S. L. (2022). Pretreatment, modification and applications