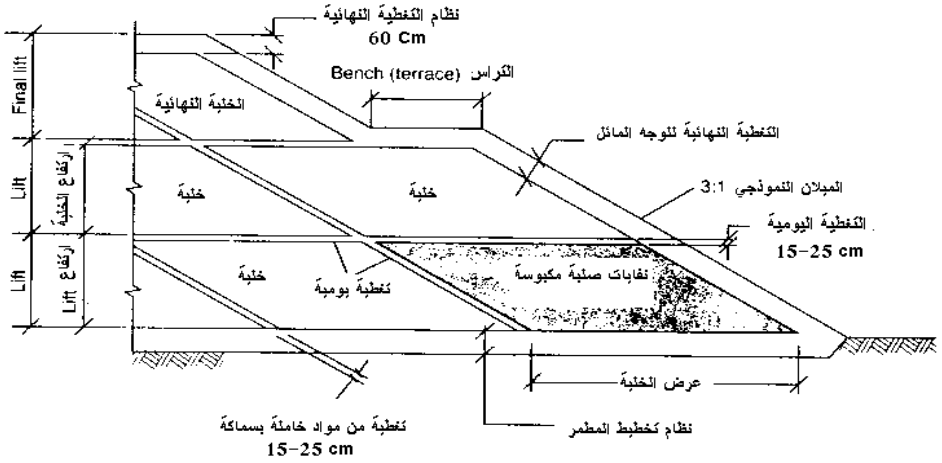
# طريقة الردم الصحي

## 8-1- مقدمة:

تُعد طريقة الردم الصحي أكثر الطرائق الهندسية يسراً وانتشاراً في التخلص من النفايات الصلبة، حيث يجري كبس النفايات الصلبة ضمن خلايا موشورية منتظمة معزولة عن البيئة المحيطة تحت سطح الأرض أو فوقه. وتُعد هذه الطريقة من الطرائق التي لا يمكن الاستغناء عنها لدى استخدام أي من الطرائق التقليدية الأخرى، وبعض الطرائق الحديثة أيضاً.

تتلخص هذه الطريقة في ردم النفايات الصلبة وتسويتها بعد تقليص حجمها في طبقات لا يتجاوز عمق أو ارتفاع الطبقة الواحدة 2m ، ويجري تغطية كل طبقة نفايات بطبقة عزل ترابية أو بأية مادة عزل مناسبة أخرى بسماكة 0.15-0.25 m، بينما تغطى الطبقة السطحية الأخيرة عند إغلاق الموقع بسماكة ترابية لا تقل عن 0.6 m .تسمى الطبقة اليومية المتشكلة يومياً بالخلية Cell، بينما تسمى الخلية مع طبقة عزلها بالـ Lift .عندما يتجاوز ارتفاع الخلايا 25 m لا بد من وضع تراس Bench or Terrace يهدف إلى تأمين استقرار انحدار المطمر، وكذلك بغية تثبيت أقنية الدرناج للمياه السطحية وإنشاء أنابيب الغاز الخاصة بالموقع. انظر الشكل (1-8).




الشكل (1-8): مقطع عرضي في خلايا موقع ردم صحي

استخدم مصطلح الردم الصحي Sanitary Landfill قديماً للإشارة إلى موقع الردم الذي تغطى فيه النفايات الصلبة في نهاية كل عملية يومية بالمواد الخاملة، إلا أن هذا المصطلح يشير الآن إلى التسهيلات الهندسية المتبعة للتخلص من النفايات الصلبة وللحصول على أقل التأثير لهذه النفايات في الصحة العامة وفي البيئة المحيطة.

إن تحديد عمق الطبقة الواحدة بالحدود السابقة يعود إلى عدم قدرة النفايات الصلبة المردومة حديثاً والمعرضة لمرور السيارات الثقيلة فوقها على الاستقرار، ويهدف أيضاً إلى الحد من أخطار الحريق الممكنة.أما عملية العزل المرحلي للطبقات اليومية فإنها تحقق أهدافاً عدةً نذكر منها:

1-منع تكاثر الحشرات، ومنع الفئران من الوصول إلى كتلة النفايات الصلبة.

2-تجنب الروائح الكريهة وحماية الهواء الخارجي من الهجرة الهوائية لمختلف المواد الضارة من سطح النفايات مع الغبار والأبخرة والغازات المنطلقة.

3-الاحتفاظ بالحرارة الناجمة عن تحلل المواد العضوية مما يساعد في القضاء على يرقات الذباب وعلى الجراثيم الممرضة.

## 8-2- المعطيات الأولية لمشاريع الردم الصحي:

لا بد لنا لدى قبل دراسة مشاريع الردم الصحي من تحضير المعطيات الآتية:

**تحديد نوع النفايات الصلبة:**

يفضل في معالجة مواقع الردم الصحي النفايات الصلبة سهلة التفكك وسهلة التحلل البيولوجي؛ كفضلات الطعام، ويستحسن فصل العناصر المرفوضة من كتلة النفايات والاستفادة منها في إعادة تصنيعها لما لهذه المواد من تأثير في حجم موقع الردم الصحي وفي عمليات تحلل للنفايات الصلبة داخل جسم المطمر، أضف إلى ذلك الفائدة الاقتصادية من الاستخدام المتكرر للمواد القابلة للاسترداد هذه. يفضل أن تتم عمليات فرز النفايات الصلبة في أماكن تشكلها؛ أي في المنزل والمصنع والمدرسة...الخ، وهي الطريقة الأفضل والأكثر تحضراً، وإلا فإن هذه العمليات تتم في مواقع خاصة ملحقة بمحطات الترحيل المرحلية أو في مواقع ملحقة بمواقع الردم الصحي. يجري عادةً استبعاد النفايات الخطرة استبعاداً كلياً من كتلة النفايات الخاضعة لعمليات الردم الصحي.

**تقدير كمية النفايات الصلبة:**

يمكن أن يجري تحديد كمية النفايات الصلبة المتشكلة يومياً إما من معلومات متوفرة عن الكميات المطروحة يومياً عن المنطقة السكنية المخدمة، أو بشكل تجريبي عن طريق وزن حمولات سيارات الجمع لمدة شهر، أو أن يجري الاعتماد على معدلات طرح النفايات الصلبة للشخص والذي يمكن اعتماده في بلدان شرق البحر الأبيض المتوسط بحدود 1.5-2.0 kg/d. يتم اعتماداً على كمية النفايات الصلبة المتشكلة يومياً تحديد كمية النفايات المتوقعة حتى نهاية العمر التصميمي لمشروع الردم الصحي.

**تقدير حجم ومساحة موقع الردم الصحي:**

يتأثر حجم المشروع بكمية النفايات الصلبة، وكثافتها ضمن خلايا الردم الصحي، والعمر التصميمي للمشروع. ويفضل أن يستوعب موقع الردم الصحي النفايات الصلبة المتولدة عن المنطقة المدروسة لمدة لاتقل عن5 سنوات وقد تصل هذه المدة من 10-25 سنة، ويمكن أن تؤخذ مدة الاستثمار أطول من الأزمنة السابقة إذا سمحت الظروف المحلية بذلك.

تجري في مواقع الردم الصحي عمليات رص النفايات الصلبة مما يسمح بزيادة تحميل النفايات الصلبة على واحدة المساحة، ويؤمن اقتصاداً في استخدام الأراضي المخصصة لهذا الغرض. تتفاوت كثافة النفايات الصلبة في حفر الردم الصحي تبعاً لجودة التنفيذ، حيث تصل في الحفر المنفذة بشكل جيد إلى $885\ kg/m^3$ ، ويمكن عادةً الحصول على كثافة تتراوح بين $472\text{-}590\ kg/m^3$ ،عن طريق بذل جهد متوسط في عملية الكبس. يمكن الحصول على زيادة كثافة النفايات الصلبة في مواقع الردم الصحي بطرائق مختلفة؛ كتكرار مرور عجلات السيارات فوق مقطع العمل، أو استخدام آليات الرص الحديثة. يضاف إلى ذلك أن عمليات تحلل المواد العضوية ضمن كتلة النفايات الصلبة تُعد عاملاً أساسياً في كبس واستقرار النفايات الصلبة ضمن مواقع الردم الصحي.وتجدر الإشارة إلى أن استخدام الآليات الخاصة بعمليات رص النفايات الصلبة أمر غير ضروري في البلدان النامية نظراً لما تحققه العمليات الطبيعية من كثافة عالية خلال وقت قصير نسبياً، وذلك نتيجةً للكثافة الابتدائية الكبيرة نسبياً لنفايات هذه البلدان.

أما المساحة السطحية لمشاريع الردم الصحي فتتأثر بشكل كبير بعمق (أو ارتفاع) خلايا النفايات الصلبة المكبوسة، حيث تنخفض المساحة المطلوبة لمشروع الردم الصحي بزيادة عمق الخلايا المنفذة،

**تحديد حركة سير الآليات والسيارات في موقع الردم الصحي:**

يجري التخطيط بشكل مسبق لحركة سير سيارات الجمع من موقع الردم الصحي وإليه؛ فيجري وضع المخطط الزمني لوصول هذه الآليات ومغادرتها، وزمن التفريغ، والمناورة، وزمن غسل الحاويات في حالات تنفيذ هذه العملية في موقع الردم

الصحي ...الخ، كما يجري تحديد أنواع المركبات المطلوبة للعمل في الموقع، من بلدوزرات وآليات تفريغ وتسوية ورص التربة ...الخ، وآلية عملها ومناورتها.

**تحديد الخدمات الملحقة بمشاريع الردم الصحي:**

تتعلق نوعية المنشآت الخدمية والصناعية وحجمها المخصصة للاستثمار في موقع الردم الصحي بحجم النفايات الصلبة الواردة إلى موقع الردم الصحي وبمدة تخديم هذا الموقع. يفضل وقوع هذه الخدمات على الجهة اليمنى لمسارات سيارات الجمع، وعلى حدود موقع الردم الصحي. تقع هذه الخدمات عادةً بجانب المقاطع التي يخطط تنفيذها في المراحل الأخيرة للمشروع في المواقع التي تكون فيها نسبة العرض إلى الطول أقل من 1:2 ، بينما تكون الخدمات الملحقة بمشاريع الردم الصحي في وسط اتجاه الطول في المواقع التي تكون فيها نسبة العرض إلى الطول أكبر من 1:3، وذلك أثناء تنفيذ هذه المشاريع في الوديان الضيقة أو المحاجر.

تتضمن المنشآت الخدمية: منشآت إدارية وخدمية، ومرآباً لوقوف السيارات وإصلاحها والآليات الموجودة ضمن المشروع، مستودعات الوقود والزيت، وساحات مكشوفة لتجميع ألواح رصف الطرقات المؤقتة والحصى، ومحطة تحويل فرعية للطاقة الكهربائية، وخزانات أو برك لإطفاء الحرائق تتسع لـ $100\ m^3$ من الماء. تضم المنشآت الإدارية والخدمية عادةً: غرفة مدير المشروع، وغرفة تبديل الملابس، وغرفة الطعام والراحة، ومجموعات الخدمات الصحية بما فيها مجموعات الأدواش، وغرفة رؤساء الورش، وغرفة الحرس مع نافذة العمليات. في مشاريع الردم الصحي التي تستقبل أكثر من $1500\ m^3 / day$من النفايات الصلبة يفضل وجود مخبر لتحليل عينات النفايات الصلبة ملحق بالمشروع، وكذلك خطوط هاتف وخدمات بلدية أخرى. تخصص في بعض مواقع الردم الصحي ساحات خاصة بإصلاح الحاويات المعدنية ودهانها. تزود مخارج مواقع الردم الصحي عادة بمنشآت حمام مخصصة لغسل عجلات سيارات جمع النفايات الصلبة الخارجة من الموقع. تنفذ هذه الحمامات من الخرسانة المسلحة بأبعاد $18x3x0.3\ m$ يجري ملؤها ببرادة معدنية معالجة بمحلول 3% من الليزول.

يجري في مواقع الردم الصحي المخدمة لنظام الحاوية المعدنية المنقولة تأمين ساحات إسفلتية لغسل الحاويات مع أجهزة الغسل اللازمة وأحواض ترسيب الأوساخ، ويجري تأمين حركة سير السيارات من ساحات الغسل وإليها من دون أن تتقاطع مع حركة سير سيارات جمع النفايات القادمة إلى المشروع.

تزود مشاريع الردم الصحي بمياه الشرب المخصصة للأغراض المعاشية المختلفة بواسطة خزانات تملأ بشكل دوري في حالات بعد شبكة الإمداد المائي عن مواقع هذه المشاريع، بينما يجري تزويد مياه الشرب في المشاريع الكبيرة (ذات الاستيعاب الأكثر من $360000\ m^3$ من النفايات الصلبة سنوياً والمصممة لمدة استثمار أكثر من 15 سنة) من خلال آبار ارتوازية تخطط ضمن تركيب المشروع.

تزود المشاريع الكبيرة جداً (ذات الاستيعاب الأكثر من $800000\ m^3$ من النفايات الصلبة سنوياً والمصممة لمدة استثمار أكثر من 15 سنة) بقبانات خاصة بسيارات الجمع بهدف حساب كتلة النفايات الصلبة القادمة يومياً إلى المشروع.

يسمح في مشاريع الردم الصحي الصغيرة (ذات الاستيعاب الأقل من $120000\ m^3$ من النفايات الصلبة سنوياً والمصممة لمدة استثمار أقل من 15 سنة) بوضع المنشآت الإدارية ومجموعات الخدمات الصحية ضمن كرافانات متحركة، كتلك المستخدمة في تنظيم العمليات الإنشائية.

يتم غسل الحاويات المعدنية في مشاريع الردم الصحي الصغيرة (ذات الاستيعاب الأقل من $120000\ m^3$ من النفايات الصلبة سنوياً والمصممة لمدة استثمار أقل من 15 سنة) بمساعدة سيارات خاصة تقوم وسطياً باستهلاك حوالي 60 لتراً من المياه من أجل غسل حاوية واحدة. يجري إمداد التيارات المائية الناتجة عن عمليات غسل الحاويات، بعد الترويق المسبق لها، إلى مرسبات الأوساخ ومنها إلى سطح تربة العزل المرحلية لمنطقة العمل الآنية وذلك بشكل مشترك مع تيارات المياه الناجمة عن

تحلل النفايات العضوية في أسفل المطمر Leachate. تُعبّد الساحات بين المنشآت الخدمية المختلفة، وتحاط المنطقة ككل بسور ذي ارتفاع 1.8 m.

**تحديد الهدف المحلي لمشاريع الردم الصحي:**

يمكننا خلال تنفيذ مشاريع الردم الصحي، تحقيق أهدف ثانوية محلية، فضلاً عن الهدف الأساسي من إنشاء هذه المشاريع، ألا وهو التخلص من النفايات الصلبة، ومن تأثيرها الضار في البيئة المحيطة. تتعلق الأهداف الثانوية المحلية بظروف موقع الردم الصحي وبظروف المنطقة المحيطة به، ونذكر من هذه الأهداف:

أ- تعبئة المناجم والمحاجر القديمة التي تم الانتهاء من استثمارها.

ب- استصلاح المستنقعات بردم النفايات فيها.

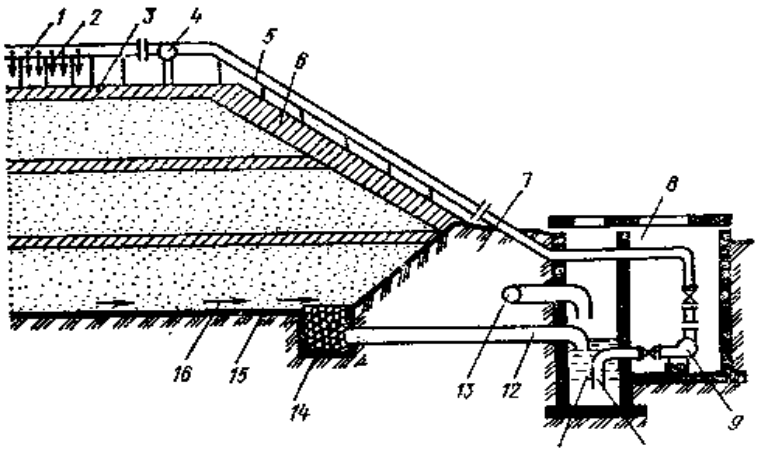
ج- استصلاح الأراضي البور :حيث نتمكن من استثمار مواقع الردم الصحي المقامة على الأراضي البور بعد إغلاقها لبعض الأغراض الزراعية.

## 3-8-اختيار موقع مشروع الردم الصحي :

Site Selection

يُعد اختيار موقع الردم الصحي من أكثر الأمور حساسيةً في مشاريع الردم الصحي، ويشترك في إجراءات هذا الاختيار ثلاثة أطراف:

1-مخططو استخدام الأراضي في المدن وإدارات التخطيط على مستوى الدولة: يقوم هؤلاء المخططون بتقديم قائمة بالمواقع المتاحة بما فيها المواقع التي يمكن تحسينها بالردم الصحي (المستنقعات، والمحاجر والمناجم القديمة ، والأراضي البور ...الخ) والتي تُعطى نسبياً درجة أولوية. يقرر هؤلاء المخططون استخدامات مواقع الردم الصحي بعد إغلاقها على المدى البعيد والمناسيب التي يجب أن يصل إليها الردم، وبالتالي التقدير الافتراضي لعمر مشروع الردم الصحي.




الشكل (4-8):مخطط إمداد تيارات المياه الناجمة عن تحلل النفايات العضوية في أسفل المطمر ومياه غسل الحاويات المعدنية إلى سطح المقاطع العاملة للمطمر. 1-أنبوب توزيع مثقب 2- قوائم رفع 3-طبقة العزل المرحلي 4-أنبوب رئيسي ممتد على طول الموقع5-أنبوب مضغوط 6-النفايات الصلبة المردومة 7-تربة مرصوصة 8-محطة ضخ 9-مضخة 10-أنبوب امتصاص 11-تيارات المياه الراشحة 12-أنبوب صرف المياه الراشحة 13-أنبوب صرف تيارات غسل الحاويات المعدنية 14-خندق صرف 15-أساس كتيم للمطمر 16-اتجاهات حركة المياه الراشحة.

2-السلطات المسؤولة عن معالجة النفايات الصلبة: تقوم هذه السلطات بتقويم المواقع المختارة من حيث بعدها عن المدينة وحجمها وتوافر الطرق المؤدية إليها والقادرة على استيعاب حركة المرور الناجمة عن العمل في موقع الردم الصحي فضلاً عن مؤشرات كثيرة أخرى تؤثر في اختيار الموقع وطبيعة تشغيله.

3–السلطات المسؤولة عن المياه: تحال المواقع بعد اختيارها من قبل السلطات المسؤولة عن معالجة النفايات الصلبة إلى السلطات المسؤولة عن المياه لتقويمها من النواحي الجيولوجية والهيدروجيولوجية والهيدرولوجية.

وفي المرحلة الأخيرة يتم إجراء مقارنة للمؤشرات البيئية–الاقتصادية للمواقع المختارة، واختيار المكان الأمثل لتوضع موقع الردم الصحي آخذين بالحسبان عدم وقوع المطمر داخل المدينة بعد التوسع التنظيمي لها.

وهناك كثير من العوامل التي تؤثر في اختيارنا لموقع الردم الصحي (Landfill Siting Consideration ) نذكر منها:

**توفر مساحات مناسبة من الأراضي** (Available land Area ):

يشترط في الموقع أن يكون ذا مساحة كبيرة، وذلك لأن كلفة التشغيل النوعي للمواقع الكبيرة أقل منها في المواقع الصغيرة؛ لذلك يفضل أن يستوعب الموقع المختار النفايات المتولدة عن المنطقة المخدمة لمدة لا تقل عن خمس سنوات، ويمكن استخدام المواقع الصغيرة بشرط توفر المسوغات لذلك. تدخل المساحات التخديمية الملحقة بمنطقة المشروع ضمن حسابات مساحة الموقع المطلوب، وتقدر هذه المساحات بـ % 40-20 تقريباً من مساحة الردم الصحي.

**مسافة النقل إلى الموقع وازدحام الحركة على الطرق المؤدية إليه:**

كلما ازدادت مسافة النقل ازدادت كلفة التشغيل؛ لذلك تفضل المواقع القريبة من حدود المناطق السكنية بمسافات لا تقل عن 500 m ، مع مراعاة ضرورة قرب هذه المواقع من طرق المواصلات بمسافة لا تزيد عن 500 m وأن تتحمل هذه الطرق شدة حركة المرور المتوقعة لدى تشغيل مواقع الردم الصحي، كما يجب أن تبعد هذه المواقع عن المطارات المجاورة مسافةً لا تقل عن 10 km وذلك لما تسببه الطيور التي تنجذب إلى مواقع الردم الصحي من خطر على حركة الطائرات. لابد من دراسة التأثير البيئي لمواقع الردم الصحي في المناطق السكنية أو الصناعية (ضجيج، وغبار، وحشرات، ونفايات متطايرة...الخ) في حالات اقتراب مواقع الردم الصحي من هذه المناطق.

**الوضع الطبوغرافي للموقع المختار:**

إن للوضع الطبوغرافي لموقع الردم الصحي أثره الكبير في عمليات تحضير هذا الموقع وفي طبيعة تشغيله وتزويده بالآليات والتجهيزات اللازمة؛ لذلك يجب أن تتم دراسة الوضع الطبوغرافي لموقع الردم الصحي بشكل دقيق أثناء تقويمه.

**الظروف المناخية للموقع المختار وهيدرولوجيا المياه السطحية:**

تتضمن الدراسات المناخية المحلية لمنطقة الموقع دراسة اتجاهات الرياح السائدة، حيث لا يسمح –مثلاً– بوجود موقع الردم الصحي في اتجاه هبوب الرياح على المناطق السكنية، وكذلك دراسة الشدة المتوقعة للرياح بغية اقتراح مصدات الرياح المناسبة؛ وذلك من أجل تجنب تطاير المواد الخفيفة كالورق والأكياس.ويفضل ألا يكون موقع الردم الصحي شديد الرياح. يضاف إلى ما سبق أنه لا بد من دراسة درجات الحرارة المنخفضة، وحالات الصقيع التي يمكن حدوثها خلال فصل الشتاء، والتي تعيق عملية الحصول على تربة العزل مما يفرض ضرورة توفير مخزون احتياطي من مادة العزل في الموقع.

تدرس التصاريف المطرية لمنطقة الموقع، وكذلك حركة المياه السطحية القريبة من موقع الردم الصحي، واحتمالات الفيضانات ضمن الدراسات الهيدرولوجية للمياه السطحية،ويفضل ألا تكون منطقة الموقع شديدة الأمطار.

**الظروف الجيولوجية والهيدروجيولوجية لموقع الردم الصحي:**

إن الظروف الجيولوجية والهيدروجيولوجية لموقع الردم الصحي تعطي صورةً واضحةً عن ملائمة هذا الموقع للردم الصحي من الناحية البيئية،وكذلك عن الشروط الهندسية الواجب اتباعها أثناء الإنشاء. وتعطي التحريات الجيولوجية أيضاً فكرةً أوليةً عن إمكانية استخدام تربة الموقع كمادة للعزل في جسم المطمر، ومدى كفاية هذه التربة لعملية العزل.

**التكلفة الاقتصادية لموقع الردم الصحي:**

وتشمل التكلفة الاقتصادية ثمن شراء أرض الموقع مع جميع الكلف المتعلقة بتحضير الموقع وتشغيله، وكذلك ثمن مبيع الأرض بعد إغلاق الموقع . إن ارتفاع سعر الموقع بعد إغلاقه يخفض بشكل كبير في بعض البلدان كلفة استئجار هذه المواقع ولسنوات طويلة حيث تتعدد إمكانيات استخدام مواقع الردم الصحي بعد إغلاقها (ملاعب بمختلف أشكالها، وحدائق ومتنزهات، واستراحات...الخ). ويستحسن دوماً البحث عن الأراضي الرخيصة أو تلك التي تحتاج إلى استصلاح.

### 8-4- التحضيرات الأولية للموقع المختار:

1- تحضير خريطة طبوغرافية للموقع بمقياس 1/1000 وبتباعد خطوط كونتور 1m، يسمح في بعض البلدان باستخدام خرائط بمقياس 1/1500 مع تباعد لخطوط الكونتور 0.5m للمواقع التي تخدم مناطق زراعية صغيرة.

2- رسم مقاطع جيولوجية بعمق أدنى قدره 4 m يجري عليها تحديد نفاذ التربة. أما في حالات وجود أنواع مختلفة من التربة فيجب إجراء مقاطع جيولوجية تصل حتى الطبقة الكتيمة مع عمق 1-1.5 m في هذه الطبقة.

تفيد المقاطع الجيولوجية في معرفة مدى الحاجة إلى إنشاء أنظمة صرف للمياه الراشحة في قعر المطمر. كما تجري عادةً دراسات مخبرية لتحديد خواص التربة أسفل الموقع.

3- تحضير خرائط هيدروجيولوجية تحدد مستوى المياه الجوفية واتجاهات تياراتها مما يفيد في تحديد العمق المسموح به للموقع تحت سطح الأرض .

4- دراسة هيدرولوجية تحمل على الخرائط الطبوغرافية تجمع فيها المعلومات الكافية عن الهطول المطري والتبخر في منطقة الموقع ومساحة المسايل الفيضانية ، ومياه الذوبانات للثلوج المتراكمة في المناطق التي تعلو الموقع في حالات وجودها .

5- تقدير حركة المرور اليومية داخل الموقع ، وتحديد عدد الآليات، وعدد العمال اللازمين للموقع .

### 8-5- تحديد معايير التشغيل لموقع الردم الصحي:

**حدود موقع الردم الصحي:**

ينشأ على حدود موقع الردم الصحي سور بارتفاع1.8 m ، وينصح باستخدام الشباك المعدنية التي تفصلها قوائم بيتونية. يجري استبدال السور بخندق ذي عمق لا يقل عن2 m في مواقع الردم الصحي القائمة على مناطق رطبة أو على مناطق منحدرة شديدة الأمطار. يمكن استبدال السور في بعض المواقع بأكوام ترابية بارتفاع لا يقل عن 3 m. يجري تصميم بوابة واحدة أو حاجز قلاب إلى الموقع، وذلك في نقطة مراقبة السيارات القادمة إلى المشروع أو الخارجة منه،ولا يسمح بإنشاء بوابات غير مراقبة على سور الموقع.

**إنارة موقع المشروع:**

تجري إنارة مشاريع الردم الصحي بواسطة مصابيح كاشفة متوضعة على صوار بارتفاع 16-20 m، مركبة خارج حدود منطقة تراكم النفايات الصلبة. عندما يزيد ارتفاع منطقة تراكم النفايات الصلبة عن ارتفاع الصواري يجري تنفيذ الإنارة لموقع العمل على المراحل الأخيرة هذه وفق مخططات لا تدخل ضمن تركيب مخططات المشروع الأولية.

**تحديد الطرق ضمن موقع الردم الصحي وآلية تنفيذها:**

تحدد الطرق في مواقع الردم الصحي استناداً إلى عدد الآليات المستخدمة في هذه المواقع ونوعيتها. ويعد الطريق الرئيسي إلى موقع الردم الصحي من أهم عناصر التشغيل لهذا الموقع، حيث يجب أن يسمح هذا الطريق بالوصول بحرية إلى أبعد نقطة من الموقع وفي مختلف الظروف الجوية.يمكن للطريق الرئيسي أن يحاذي أحد جوانب الردم أو أن يكون مركزياً بحيث يخترق الموقع كاملاً. يفضل إحاطة الطريق الرئيسي من جهتيه بالسياج، ويفضل إحاطة الطرق الفرعية –قدر الإمكان– بالسياج أيضاً. يتفرع الطريق الرئيسي عن الطريق المؤدي إلى المدينة بطول لا يقل عن 60 m وذلك لتجنب تأثير الازدحام المحتمل من سيارات جمع النفايات الصلبة على حركة المرور للطريق المؤدي إلى المدينة.

تنفذ الطرق المؤقتة عادةً بعرض لا يقل عن 6.5 m ويؤخذ عرض الطريق المؤدي إلى جبهة العمل بما لا يقل عن m 8.5. لدى ارتفاع الطرق عن مستوى المقاطع المردومة تنفذ جوانب الطريق بميل 1:4. تنفذ الطرق الصاعدة بميل لا يزيد عن 7% وبميل لا يزيد عن 10% بالنسبة للطرق الهابطة. تنفذ الطرق الرئيسة وفق الكودات المتعارف عليها لتنفيذ طرق المواصلات، أما الطرق المؤقتة فيمكن تنفيذ أساساتها من النفايات الصلبة أو من نفايات الأنقاض المرصوصة على طبقات عن طريق مرور المدحلة عليها من 5-4 مرات. أما مواد التغطية بالنسبة للطرق المؤقتة فهي كثيرة ويمكن أن تتكون من قطع بلوك إنشائية مرفوضة على فرشة رملية، أو من نفايات الأنقاض على فرشة رملية، أو من حصى على فرشة رملية. وقد تستخدم نفايات ورشات النجارة لهذا الغرض. تولى الطرق المؤقتة اهتماماً أكبر عند استخدام ناقلات النفايات الضخمة. يتم إنشاء الطرق المؤقتة في المشاريع التي تستوعب أكثر من $500000\ m^3$ من النفايات الصلبة سنوياً بمساعدة عمال اختصاصيين. تدرس عمليات إنشاء الطرق المؤقتة وإصلاحها وتأمين مواد التغطية لها في مخططات استثمار موقع الردم الصحي، وتدخل ضمن الكلف الاقتصادية للتشغيل.

**العلامات والأوتاد:**

يجري وضع صفين من الأوتاد مع وضع قوائم عرضية على ارتفاع الطبقة في منطقة العمل، وذلك حتى لا يتجاوز العمال العمق المطلوب للطبقة مع تقدم العمل. تساعد الأوتاد في مراقبة رص النفايات الصلبة داخل خلايا الردم، فيجب ألا يزيد عمق الطبقات المرصوصة لنصف يوم عمل عن m 1. يمكن استخدام البلدوزر كمؤشر قياس متحرك، وذلك برسم خط أبيض لامع على هيكله على ارتفاعm 2 عن الأرض. الأوتاد عبارة عن أعمدة خشبية أو معدنية شاقولية، ويمكن استخدام الأوتاد المصنوعة من الخرسانة المسلحة. تقسم الأوتاد وفق تدرجات ذات تباعد قدره m 0.25 بواسطة دهان لامع.

**مراقبة خطر تلوث المجمعات المائية:**

تتشكل مياه الرشح (الرشاحة) في مواقع الردم الصحي من المياه الراشحة عبر كتلة النفايات الصلبة أو المتقطرة نتيجة تحلل هذه النفايات. وتشكل المياه القادمة إلى الموقع من مصادر خارجية ( سيول، وأمطار ...الخ) الجزء الرئيسي من كمية الرشح الكلية؛ لذلك فإن عملية الإنشاء الهندسي السليم لمواقع الردم الصحي والعزل المناسب لها عن تأثير المياه الخارجية يخفض بشكل كبير كمية مياه الرشح الناتجة، وبالتالي كمية التلوث المتوقع للمجمعات المائية.

أظهرت التجارب الاستثمارية عدم إمكانية تشكل مياه الرشح الناتجة عن الهطولات المطرية في مشاريع الردم الصحي المنفذة في المناطق الحارة والجافة؛ أي التي لا تزيد فيها كمية الهطول المطري السنوي عن mm 100 عن كمية الرطوبة المتبخرة من السطح وذلك للنفايات ذات الرطوبة الأقل من 0.52% ، وبالتالي لا حاجة في هذه الظروف إلى التشدد في تنفيذ قاعدة موقع الردم الصحي، أي لا ضرورة لزيادة كتامة تربة القاعدة. بينما تنفذ هذه القاعدة مع أخذ إمكانية تشكل الطور السائل (المياه الراشحة) بالحسبان في الظروف المغايرة.

تشكل الرشاحة الناتجة عن تقطر النفايات في مواقع الردم الصحي خطراً كبيراً على المجمعات المائية نظراً لوجود كثير من العناصر السامة في النفايات الصلبة والتي يمكن أن تنتقل مع مياه الرشح إلى المصادر المائية بتراكيز غير مسموحة تجعل مياه المجمعات المائية غير صالحة لأغراض الإمداد المنزلي والزراعي

تجري مراقبة تلوث المياه الجوفية بمياه الرشح الناتجة عن مشاريع الردم الصحي عن طريق حفر آبار مراقبة على محيط مشروع الردم الصحي. تعطي مقارنة عينات المياه من الآبار العلوية بحسب حركة المياه الباطنية مع عينات المياه من الآبار السفلية بحسب حركة المياه الباطنية صورةً عن تأثير موقع الردم الصحي في نوعية هذه المياه.

في حالات الأعماق غير الكبيرة للمياه الباطنية تحفر آبار مراقبة بقطرmm700-900 بمنسوب أخفض بحوالي m 0.2 عن منسوب المياه الباطنية. ويتركب قاع الترشيح لهذه الآبار من طبقة من الحصى بسماكة mm 200 . تسمح هذه الآبار

بالنزول إليها بواسطة سلالم خاصة، وتؤخذ بالحسبان إجراءات حماية هذه الآبار من التلوث الخارجي المحتمل. يتم تجنب الجرعات الأولى من العينات، وذلك لتجنب الحصول على عينة شاذة. إن نظام أخذ العينات وتحليلها يجري كما في أنظمة الإمداد المائي، وفي مخابر الإمداد المائي والصرف الصحي.

**السيطرة على الحرائق في حالات حدوثها:**

تحدث الحرائق في مواقع الردم الصحي لأسباب كثيرة أهمها:

-بقايا الرماد المشتعل المنقول ضمن حمولة سيارات جمع النفايات الصلبة.

-إلقاء أعقاب السجائر المشتعلة من قبل عمال الجمع ضمن كتلة النفايات الصلبة.

-انعكاس أشعة الشمس على قطع الزجاج الموجودة على سطح النفايات الصلبة.

يمكن تفادي هذه الحرائق التي قد تسبب فجوات داخلية تؤدي إلى انهيار السطح في حالات الحرائق العميقة عن طريق التوعية المستمرة للعمال، ومعاقبة المخالف منهم، وعدم السماح لهم مطلقاً بإشعال النار للطهي، أو للتخلص من النفايات كبيرة الحجم كفروع الأشجار، وكذلك منع دخول العابثين بالقمامة بعد انتهاء ساعات العمل. لدى اشتعال النيران في الحرائق العميقة لا بد من الحفر أولاً لإخراج الجزء المشتعل قبل استخدام المياه في الإطفاء، وقد تحتاج الحرائق العميقة إلى استخدام البلدوزر لإخراج الجزء المشتعل.

**منع تطاير الغبار والنفايات الخفيفة أثناء عمليات تشغيل موقع الردم الصحي:**

يتشكل الغبار بشكل أساسي في أوقات الجفاف الطويلة مما يستدعي رش التراب بشكل دوري بالمياه أو ببعض الزيوت المستهلكة. أما تطاير النفايات الخفيفة فيحدث في المواقع ذات الرياح الشديدة، والتي تُطمر فيها نفايات ذات نسبة كبيرة من الورق واللدائن. ويفضل، لتفادي ذلك، استخدام مصدات من الشباك بعرض 2.5 m للواحدة وبارتفاع 4-5 m ذات خلايا للشباك 50-40 mm. تُصف هذه المصدات على شكل قوس يوضع بالجهة المعاكسة لاتجاه الرياح، وتجمع النفايات المحجوزة خلف هذه المصدات بشكل منتظم، بمعدل مرة واحدة على الأقل لكل وردية.

**الوقاية من الكائنات الممرضة ومكافحة نواقل المرض:**

يظهر التأثير الأكبر للكائنات الممرضة على العمال الذين يتعرضون للتماس المباشر مع النفايات الصلبة، لذلك لا بد من إلزام العمال على ارتداء الملابس الواقية(أحذية مطاطية طويلة وقفازات غير قابلة للثقب، وملابس خارجية خاصة)، وتجبر بعض الدول العمال على ارتداء أغطية للمجاري التنفسية. يجري دورياً تبديل الملابس، وغسلها بشكل دوري.

لا تظهر خطورة الحشرات في حالات استخدام العزل المرحلي إلا في حالات التنفيذ السيئ لخلايا النفايات الصلبة، أو في حالات العبث والإهمال من قبل العمال، لذلك لا بد من مراقبة هذه الأمور بشكل دائم، ورش المبيدات الحشرية عند الضرورة. في حالات استرداد بعض المواد المفيدة من كتلة النفايات الصلبة في موقع المشروع لا بد من إجراء هذه الأعمال بشكل منظم، كما يجب ألا تتجاوز مدة تخزين هذه المواد في الموقع عن يومين مع مراعاة ضرورة رشها بالمبيدات الحشرية بشكل دوري. عندما تنجذب بعض القوارض من المناطق المجاورة إلى موقع العمل يجب المسارعة إلى القضاء عليها باستخدام السموم، واستدعاء مجموعات المكافحة الخاصة في حالات الضرورة.

**تشغيل موقع الردم الصحي في حالات المطر الكثيف:**

تؤدي الأمطار الغزيرة أحياناً إلى انغراز عجلات السيارات في كتلة النفايات، لذا تزود المواقع بتجهيزات خاصة تعمل كطريق متنقل في حالات المطر الكثيف، فضلاً عن ضرورة توفر آليات مخصصة لإنقاذ السيارات في حالات انغرازها، وتترك مساحات احتياطية قريبة من الطريق الرئيسي لاستخدامها في حالات كهذه، وفي حالات الطوارئ.

### 8-6-تحديد معايير التصميم لمواقع الردم الصحي:

1- يجب ألا تتجاوز أقصى مسافة تقطعها سيارات الجمع فوق كتلة النفايات الصلبة 100m، وكلما كانت هذه المسافة أقل كانت ظروف التشغيل أفضل.

2- يفضل أن تكون واجهة العمل اليومية ضيقة وذلك من أجل التغطية اليومية السريعة للخلية اليومية، إلا أن الواجهة الضيقة قد تؤدي إلى ازدحام سيارات الجمع في الموقع مما قد يؤدي إلى زيادة زمن رحلة السيارة، وبالتالي يخفض من عدد الرحلات اليومية الممكنة لها؛ أي يؤدي إلى زيادة كلفة جمع النفايات الصلبة.

ويمكن تخطي هذه السلبية بإنشاء محطة ترحيل موضعية تمّكن سيارات النقل من تفريغ حمولتها سريعاً والعودة لمسلك جمع آخر دون الانتظار في الموقع، ثم يتم نقل النفايات من المحطة الموضعية إلى واجهة العمل اليومية.

3- يختلف طول الخلية اليومية وعرضها تبعاً لظروف الموقع، وحجم التشغيل، وطريقة التفريغ. ويكون التفريغ إما على خط عرض الخلية أو على خط طولها، لذلك فإن عدد سيارات الجمع التي قد تصل مع بعضها في ساعات الازدحام العظمى تلعب الدور الأكبر في تحديد أحد هذين البعدين. وتشكل العربات ذات التفريغ اليدوي ارباكاً كبيراً لعملية التشغيل في مواقع الردم الصحي التي تستقبل سيارات الجمع ذات التفريغ الآلي.

يؤخذ طول الخلية أكبر بعشرة أمثال المسافة بين العجلات الخلفية والأمامية لآلية الرص الحديثة في حالات استخدامها في مواقع الردم الصحي، وذلك لتسهيل مناورة هذه الآلية فوق الخلية. أما عمق الخلية فتحدده استطاعة آلية الحفر ومنسوب المياه الجوفية.

4-تعطى أكوام النفايات المردومة ميلاً حوالي 1:3 أو 1:4 وذلك لتأمين ثباتها دون انهيار.

5-تحسب كمية الأتربة المستخدمة في الردم يومياً كمادة للعزل المرحلي بحساب مساحة الأوجه الواجب تغطيتها يومياً وضربها بسماكة طبقة العزل هذه. ويمكن تقدير كمية هذه الأتربة بشكل أولي كنسبة من حجم النفايات الصلبة في الموقع على الشكل الآتي: يكفي $1\ m^3$ من الأتربة للعزل المرحلي لحوالي $4\text{-}6\ m^3$ من النفايات الصلبة المردومة.يمكن في حالات كثيرة عدم اللجوء إلى تغطية واجهة عمل الخلية.

6- يفضل كبس النفايات في الخلية اليومية على طبقات مرحلية بحيث لا تزيد سماكتها عن 0.5m، وذلك لتأمين الرص الجيد للنفايات وتحطيم النفايات الضخمة في حالات وجودها.

### 8-8- طرائق الردم الصحي:

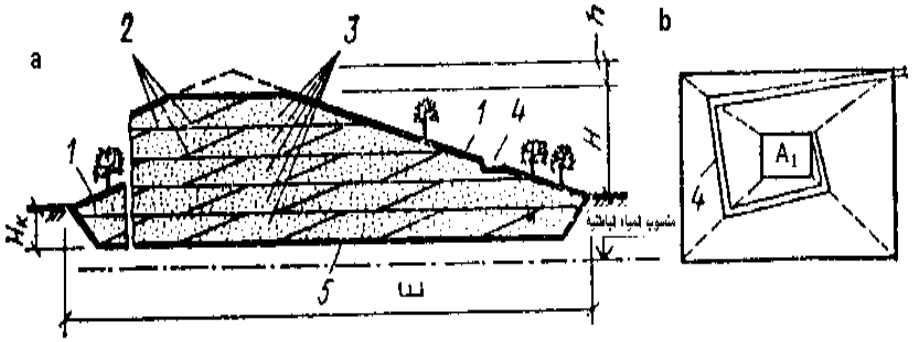
هناك عدد من طرائق الردم الصحي نذكر منها:

#### 1- طريقة الفرش السطحي (طريقة المساحة- Area Method ):

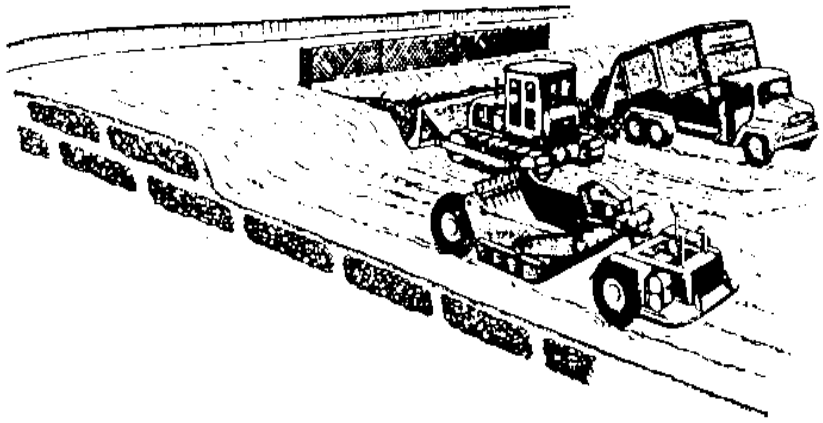
تعتمد هذه الطريقة عندما تكون منطقة موقع الردم الصحي غير صالحة للحفر وإنشاء الخنادق فيها. تفرش النفايات الصلبة في هذه الطريقة على مقاطع طولية فوق سطح الأرض، تجري تغطيتها اليومية بطبقة عزل ترابية تُجلب من أراض مجاورة بواسطة آليات نقل التربة. يتراوح عرض الخلية اليومية من 2.5-6 m ، بينما يتعلق طولها بالعمق المقترح لها.

يمكن بحسب الظروف المحلية للموقع البدء بالردم الصحي من مستوى أخفض من سطح الأرض، وذلك بغية الاستفادة من التربة الزراعية في الموقع في حالات وجودها، والحصول على تربة العزل النهائية للموقع. يحدد ارتفاع موقع الردم الصحي أعلى سطح الأرض (H) من شروط انحدار الميل الخارجي (1:4) ومن التوصيات المعمارية، ومن ضرورات تأمين العمل الآمن لسيارات نقل النفايات وآليات الرص. يرتبط ارتفاع الموقع بعرض القطاع للمساحة العلوية (B1) وللمساحة السفلية أي لقاعدة المطمر (B2)، وكذلك بشروط انحدار الميل الخارجي(1:4) بالعلاقة الآتية:

$$H = \frac{B_2 - B_1}{8} ....., m \qquad (8\text{-}1)$$




الشكل (15-8) : مخطط لموقع ردم صحي منفذ بطريقة الفرش السطحي. a– مقطع عرضي للموقع b –مخطط الطريق إلى المساحة العلوية. 1–طبقة العزل النهائية 2–طبقات العزل المرحلية 3–النفايات الصلبة المرصوصة 4–الطريق إلى المساحة العلوية 5–القاعدة الكتيمة 6–المساحة العلوية.



الشكل (16-8): آلية تنفيذ طريقة الفرش السطحي.

**2- طريقة الخنادق( Trench Method ):**

تستخدم هذه الطريقة في المناطق التي تتوافر فيها مادة العزل الترابية بعمق مناسب بعيداً عن المستوى الأعظمي للمياه الجوفية. يمكن تجميع النفايات الصلبة على أحد أطراف الخندق لتشكل حاجزاً ثم ترمى في الخندق وترص، أو أن يجري استقبال النفايات الصلبة مباشرةً من سيارات الجمع إلى الخندق المحفور. يجري الاستفادة من تربة الخندق نفسه لأغراض العزل المرحلي والنهائي للموقع، ويفضل الاحتفاظ بالتربة الزراعية العلوية للخنادق لاستخدامها كتربة عزل نهائي للموقع. ولا توجد غالباً أية مشكلات يمكن وقوعها في هذه الطريقة من أجل تأمين تربة العزل. يجري الردم في الخندق من إحدى نهايتيه وباتجاه طوله. تفصل الخنادق عن بعضها بمسافة قدرها 0.5 m انظر الشكل (17-8).

تصمم الخنادق بشكل متعامد مع حركة الرياح السائدة في المنطقة بعمق 1-2 m ،وقد يسمح في بعض البلدان بأعماق للخنادق تصل حتى 6 m.يؤخذ العرض السفلي للخندق 5-8m ويسمح بأن يصل هذا العرض في بعض البلدان حتى 12 m. يجب أن يتناسب العرض السفلي للخندق مع عمقه، فالخنادق العميقة مثلاًm 6 تؤخذ بعرض سفلي كبير 12m ،بينما الخنادق ذات العمق 3m مثلاً تؤخذ بعرض سفلي قدره 8 m . لا يقل طول الخندق الواحد عن 30 m يقوم باستيعاب النفايات الصلبة المتراكمة لمدة شهر كامل، وقد يصل استيعاب الخندق الواحد إلى عدة أشهر.

تركب شبكات الصرف (الدريناج) عادةً في منتصف القواعد السفلية للخنادق وعلى طول الخندق، وتجمع هذه المياه بأنابيب رئيسية على عرض الموقع. تعطى الخنادق ميلاً طولياً بحدود 0.007 لتأمين الراحة في حركة مياه الصرف. يؤخذ الميل الجانبي للخنادق بحيث يؤمن الثبات بوجود الحمولات الديناميكية، وتؤخذ بالنسبة للترب الرملية 1:1، وللترب الطفلية الرملية – 0.5 :1 0.75 أما للترب الغضارية 0.5-0.25 :1.

3- **طريقة الميل** ( Ramp Method ):

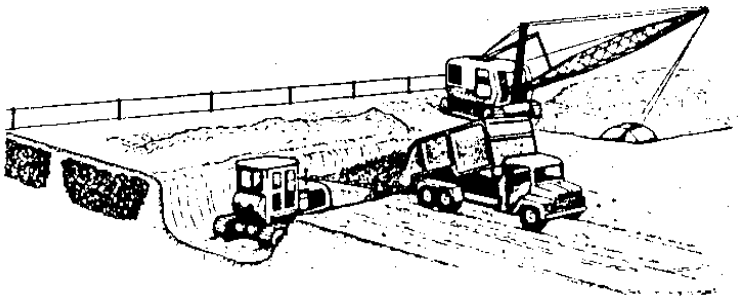
تستخدم هذه الطريقة وسيلة للجمع بين طريقتي المساحة والخنادق في تنفيذ مواقع الردم الصحي، وذلك في حالات توقع الحصول على تربة العزل من الموقع ذاته وضرورة إعادة تشكيل تضاريس منطقة الموقع.

4- **طريقة المنخفضات** (Canyon / Depression Method ):

تستخدم هذه الطريقة لردم النفايات الصلبة في منخفضات طبيعية كالأودية، أو في منخفضات محفورة مسبقاً لأغراض غير ردم النفايات الصلبة كالمحاجر والمناجم ...الخ. وتختلف طريقة التعامل مع مواقع الردم الصحي المنفذة بهذه الطريقة تبعاً للخواص المحلية لهذه المواقع.

من أجل ردم المنخفضات الطبيعية يجري عادة تحضير هذه المواقع بإنشاء ميلانات عكسية في قاعدة الموقع تؤمن تعشيق النفايات الصلبة مع بعضها بعضاً، وتمنع انزلاقها مع الميل، كما تعطى الحواف الخارجية لهذه المنخفضات ميلانات معاكسة أيضاً تفيد في تغيير اتجاه مياه الفيضانات والهطولات المطرية الشديدة باتجاهات بعيدة عن الموقع. تقسم منطقة الموقع عادةً إلى قطاعات إنشائية على عمق الموقع، بحيث لا تتجاوز فروقات الارتفاع في القطاع الواحد 10m، وتجري حماية النفايات الصلبة من الانزلاق المحتمل لها بإنشاء سدود ترابية. في حالات تنفيذ الفرش السطحي أعلى حواجب الموقع تعطى هذه الجوانب ميلاً قدره 1:4). تصرف مياه الرشح من هذه المواقع بواسطة شبكات دريناج تنفذ في أخفض نقاط الموقع ويفضل تزويدها بحفر تفتيش كل 50-100mعلى كامل ارتفاع النفايات الصلبة المتراكمة.

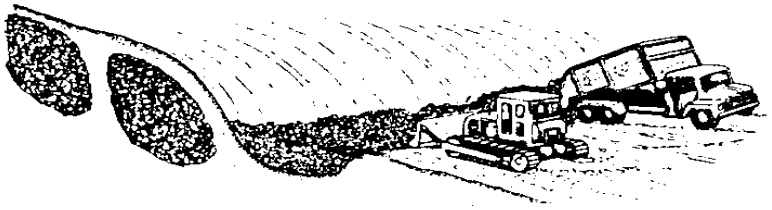
أما من أجل ردم المنخفضات الاصطناعية كالمحاجر والمناجم فيمكن تنفيذ الردم في هذه المواقع كما في المنخفضات الطبيعية وبمستويات تصل حتى حافة المنخفض، أو بمستويات أعلى من حواجب المنخفض. ويراعى في الحالة الأولى فرش الطبقة النهائية بمنسوب أعلى من مناسيب حواجب المنخفض بمقدار الهبوط المحتمل للنفايات الصلبة المتراكمة المرصوصة خلال السنوات الخمس الأولى من إغلاق الموقع، والناتجة عن عمليات التفسخ والتحلل، يضاف إلى ذلك عمليات الارتصاص الطبيعي للنفايات الصلبة. وقد يصل هذا الهبوط إلى أكثر من 1/3 عمق الموقع.



الشكل (17-8): طريقة الخنادق في تنفيذ مواقع الردم الصحي.

يُعد استخدام المنخفضات الاصطناعية كمواقع للردم الصحي اقتصادياً أكثر في حالات توافر تربة الغطاء القريبة. تحتوي هذه المنخفضات عادةً على طرق قديمة تصل إلى قاع المنخفض مما يوفر كلف تشغيل هذه المواقع.

– استخدام أنظمة البطانة الخاصة بطبقة التغطية النهائية.



الشكل (19-8): طريقة الميل في تنفيذ مواقع الردم الصحي.

5- **الردم الصحي في المناطق الرطبة** (Landfills in wetland areas ):

ويقصد بالمناطق الرطبة المستنقعات، والسبخات، والبحيرات الضحلة، ومناطق المد والجزر...الخ. ويتم تقسيم هذه المواقع عادةً إلى برك صغيرة منفصلة بمساحات لا تتجاوز 1 هكتار، وذلك بإنشاء سدود من النفايات الخاملة بين هذه البرك. ثم تسحب المياه من هذه البرك وتردم كما في الطرائق السابقة. تُعد كلف تشغيل المناطق الرطبة عالية جداً مع الصعوبات الكبيرة في حماية البيئة المحيطة من التلوث المحتمل الناجم عن تراكم النفايات الصلبة في هذه المواقع.

## 9-8- السيطرة على المياه الراشحة من مواقع الردم الصحي:

تسحب المياه الراشحة عبر كتلة النفايات الصلبة، أو المتقطرة نتيجة تحلل هذه النفايات جزءاً من المواد المنحلة من كتلة النفايات الصلبة، ونواتج تحلل هذه النفايات مما يعطيها تركيباً كيميائياً معقداً، يجعلها تشكل خطراً كبيراً على المجمعات المائية. تجري عمليات السيطرة على المياه الراشحة من موقع الردم الصحي من خلال الإجراءات الآتية:

- استخدام أنظمة السيطرة على المياه السطحية في منطقة المشروع.
- تكتيم قاعدة موقع الردم الصحي، وإنشاء أنظمة البطانة الخاصة بجمع الرشاحة.
- استخدام الأنظمة المناسبة لتجميع الرشاحة ونقلها خارج الموقع.
- استخدام أنظمة معالجة الرشاحة أو التخلص منها بشكل يناسب القوانين البيئية المفروضة.

### أنظمة السيطرة على المياه السطحية ( Surface Water Control Systems ) :

يُعد حدوث الرشح بسبب الأمطار في مواقع الردم الصحي أمراً طبيعياً لا يمكن تفاديه في المراحل الأولى للعمل في الموقع، وتُعد تيارات الرشح أهم العقبات التي تعترض عمليات التنفيذ في السنوات الأولى لتشغيل الموقع، والتي تجعل ظروف العمل صعبة جداً. وتسهم هذه المياه في الإساءة إلى الوضع البيئي العام للمجمعات المائية المحيطة بالموقع، ولتخفيض أثرها السلبي لا بد أولاً من التفكير بتخفيض كميتها، وتخفيض إمكانية تقاطعها مع النفايات الصلبة في موقع الردم الصحي. وبالتالي تزداد كمية الرشح بشكل كبير جداً عندما تنساب المياه من الأراضي المرتفعة عبر موقع الردم، والأسوأ أن تخترق هذه المياه موقع الردم الصحي بشكل شاقولي، لذلك يتم اللجوء في الأوضاع المشابهة إلى تنفيذ بعض الأعمال الهندسية في الموقع، حيث يتم:

1- إنشاء عبارات لكل مسارات المياه التي تمر بالموقع.

2- تحويل مياه الأراضي المرتفعة القريبة من الموقع عبر قنوات تجميع محيطة بالموقع.

3- إعطاء السطح الخارجي لموقع الردم الصحي ميلاً يسمح بحركة المياه المتسربة، أو الأمطار المتساقطة على الموقع كمسيل فوق السطح (% 5-3)، واحتواء هذه المياه ضمن أقنية محيطة.

4- منع تسرب المياه الراشحة إلى المصادر السطحية القريبة من خلال إنشاء حواجز متماسكة من مواد كتيمة غير نفاذة.

### تكتيم قاعدة موقع الردم الصحي:

يجري تكتيم قاعدة موقع الردم الصحي من خلال تنفيذ قاعدة من مواد كتيمة، وبسماكات تتعلق بمعامل الترشيح لهذه المواد، فإذا كانت تربة أرضية الموقع طفلية أو رملية ثقيلة وبمعامل ترشيح $K< 1.10^{-7}$ cm/sec وبسماكة لا تقل عن 0.3 m ، وكذلك إذا كانت الترب السابقة بمعامل ترشيح$1.10^{-6} - 1.10^{-5}$ cm/sec وبسماكة لا تقل عن 0.5 m فلا حاجة للعزل الإضافي، أما إذا كانت التربة طفلية رملية بمعامل ترشيح$1,5.10^{-5} - 1,3.10^{-5}$ cm/sec وبسماكة لا تقل عن 0.5 m فينصح بزيادة كتامة القاعدة بالدحل حتى الوصول إلى معامل ترشيح أقل من $1.10^{-5}$ cm/sec . أما في حالات الترب الرملية أو الطفلية الرملية الخفيفة أو الرملية الطفلية ذات معاملات الترشيح $3.10^{-5} - 1.10^{-2}$ cm/sec فينصح بأحد الحلول الآتية:

1- إحضار تربة طفلية إلى الموقع بسماكة 0.5 m وذلك بحسب التصورات الاقتصادية.لا بد من الانتباه الشديد لدى تنفيذ بطانة طبقة الطفل في الموقع، نظراً لنزعة الطفل نحو تشكيل التصدعات بفعل الجفاف؛ لذلك لا يسمح مطلقاً بجفاف الطفل بعد فرشه في الموقع. لتشكيل طبقة الطفل بشكل مطابق للتصاميم المقترحة لا بد من إجراء عملية فرشه في الموقع على طبقات سماكة الطبقة الواحدة 100-150 mm مع الرص الكافي للطبقات المتتالية. مشكلات كثيرة يمكن أن تنشأ عند عدم مراعاة التنفيذ الجيد لعملية الفرش، أو عند الاختيار غير المناسب للمواد المستخدمة، فعلى سبيل المثال يمكن أن تتصدع بطانة الطفل لدى استخدام نوعين من الطفل متباينين في درجة الانتفاخ. يمتاز الطفل الصناعي الأرضي (Geosynthetic Clay Liner ) المصنع من طفل بينتونيتي عالي النوعية ومواد ربط ملائمة بسعة امتصاص عالية للمياه تفوق عشرة أضعاف وزنه. يشكل الطفل الصناعي الأرضي -الذي هو عبارة عن مينيرال مونتموريلونيت صوديومي (Sodium Montmorillonite Mineral )- عائقاً جيداً لحركة المياه عبره في حالته المشبعة.

2- يسمح في بعض البلدان باعتماد التربة الرملية إذا كانت المسافة الفاصلة بين مستوى أرضية الموقع وأعلى منسوب للمياه الجوفية تزيد عن 6 m ، وباعتماد الترب الرملية الطفلية إذا كانت هذه المسافة تزيد عن 4 m .

3- إنشاء غشاء بسماكة 5-10mm من منتجات الصناعات النفطية أو نفاياتها بمعدل .50 t/hec مع التغطية بسماكة ترابية 0.3 m.

4- إنشاء قاعدة من بطانة اصطناعية من طبقتي بولي ايتيلين بسماكة 0.2m على أرض مستوية. تزّحل هذه الرقائق إلى الموقع على شكل لفات، حيث يتم لحامها مع بعضها بعضاً في الموقع بواسطة أجهزة خاصة بذلك. يجري ربط هذه الرقائق فيما بينها بواسطة مواد مصطكائية خاصة مع مسافة تراكب فيما بينها بحدود 0.5 m .

**أنظمة البطانة الخاصة بجمع الرشاحة:**

جرى في السنوات الأخيرة عرض أنظمة مختلفة لبطانة موقع الردم الصحي، تهدف إلى تخفيض عبور الرشاحة المتقطرة من الموقع إلى التربة الواقعة أسفل موقع الردم الصحي، وبالتالي إلى المياه الجوفية أسفل الموقع، مما يقلص من خطورة تلوث المياه الجوفية بهذه الرشاحة.

يتكون نظام البطانة من مجموعة من الطبقات لكل منها وظيفة محددة؛ فعلى سبيل المثال تستخدم طبقة الطفل وطبقة الغشاء الأرضي (الجيوميمبران-Geomembran) كعائق فعال لحركة الرشاحة والغاز من موقع الردم الصحي، وتستخدم طبقة الحصى والرمل كمجمع، وكطبقة درناج لأية رشاحة يمكن أن تتولد في الموقع، حيث يجري تنصيب أنابيب مثقبة لتجميع الرشاحة في هذه الطبقة. تستخدم طبقة النسيج الأرضي (Geotextile) لتخفيض عملية التمازج الممكنة بين طبقة التربة وطبقة الرمل والحصى، ويمكن استخدام هذه الطبقة كطبقة درناج للانحدارات الجانبية، حيث إنها أقل وزناً، وأكثر استقراراً، وأكثر مقاومةً لقوى القص من طبقة الدرناج التقليدية (طبقة الحصى والرمل)، بينما يستبعد كثير من المصممين استخدام هذه الطبقة كبديل لطبقة الدرناج التقليدية الموجودة في قاعدة موقع الردم الصحي، بسبب خطورة انسداد هذه الطبقة. تستخدم طبقة التربة النهائية كطبقة حماية لطبقة الدرناج ولطبقة العائق.

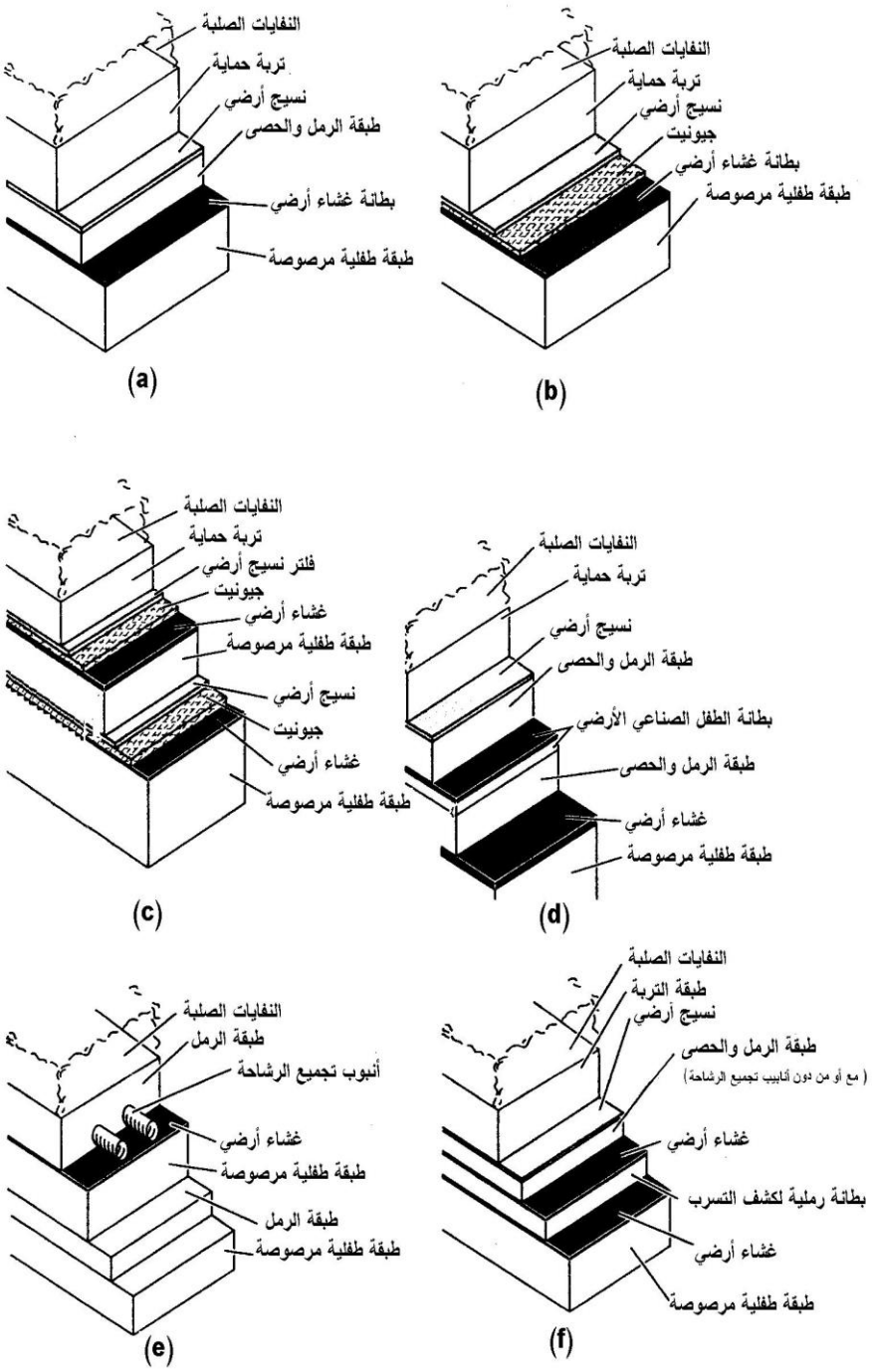
ينتشر استخدام أنظمة البطانة الاصطناعية في الوقت الحالي بهدف ضبط حركة الرشاحة والغاز من موقع الردم الصحي، حيث تعيق البطانة المصنعة من الأغشية الاصطناعية المرنة (FMLs-Flexible Membrane Liners) حركة الغاز والرشاحة إلى خارج حدود موقع الردم الصحي، إلا أن كثير من المصممين يفضلون استخدام البطانة الطفلية للحد من تقطر الرشاحة من موقع الردم الصحي، نظراً لقدرة الطفل على امتزاز وحجز كثير من المواد الكيميائية الموجودة في الرشاحة، ولقدرته على مقاومة جريان الرشاحة إلى خارج حدود موقع الردم الصحي. وقد انتشر في الوقت الحالي استخدام البطانة المركبة من بطانة الأغشية الاصطناعية المرنة والبطانة الطفلية معاً، لما لكل منهما من ميزات، حيث يُعد هذا التمازج بين البطانتين أكثر أماناً، وأكثر فعالية هيدروليكية من أي بطانة منفردة.

الجدول (8-8): بعض المواد المستخدمة لتكتيم قاعدة موقع الردم الصحي بهدف ضبط حركة الرشاحة والغاز إلى خارج موقع الردم الصحي .

| التصنيف | النماذج المستخدمة | ملاحظات |
|---|---|---|
| تربة مرصوصة | – | يجب أن تحتوي هذه التربة على بعض الطفل أو الطمي الناعم |
| طفل مرصوص | بينتونيت (Bentonites) ، ايليتس (Illites )، كاؤلينيت ( Kaolinites) | أكثر الطبقات انتشاراً في الاستخدام في مواقع الردم الصحي، يجب أن تكون هذه الطبقة مستمرة ولا يسمح بجفافها وتصدعها |
| مواد لاعضوية | كربونات أو سيليكات أو بيروفوسفات الصوديوم | يعتمد استخدامها على خواص التربة المحلية |
| بطانة من مواد اصطناعية | PE,PVC,Hypalon, Butyl Rubber, Nylonreinforced liners | شائعة الاستخدام لضبط حركة الرشاحة، ويتزايد حالياً استخدامها لضبط حركة الغاز |
| إسفلت | إسفلت مطور، إسفلت مشرب بالمطاط ، إسفلت مغطى بألياف البولي ايتيلين، بيتون اسفلتي | يجب أن تكون الطبقة سميكة كفاية لتحافظ على الاستمرارية في ظروف التوضع المختلفة |
| مواد أخرى | إسمنت ترابي، إسمنت ترابي بلاستيكي، Gunite Concrete | غير شائعة الاستخدام لضبط حركة الغاز والرشاحة، بسبب التصدعات الناتجة عن التقلص بعد الإنشاء |

يجري اختيار نظام البطانة اعتماداً على الدراسة الجيولوجية المفصلة للموقع وعلى المتطلبات البيئية لمنطقة الموقع، فمثلاً قد تكون البطانة المفردة، ملائمة للمواقع التي لا يوجد فيها مياه جوفية، بينما يجري استخدام نظام البطانة المزدوجة، في مواقع الردم الصحي التي لا بد فيها من السيطرة على هجرة الغازات والمياه الراشحة من المواقع.

تتكون البطانة المزدوجة من بطانتين مرصوصتين، إحداهما أولية والأخرى ثانوية، حيث تستخدم البطانة الأولية لجمع الرشاحة، بينما تستخدم البطانة الثانوية كنظام لكشف التسرب وكبطانة داعمة للبطانة الأولية، حيث يجري وضع حساسات كشف التسرب بين البطانتين السابقتين.




الشكل (23-8 ): نظام البطانة.a,b –تظام البطانة المفردة c,d,e,f–نظام البطانة المزدوجة

تتكون بطانة التغطية النهائية الحديثة من مجموعة من الطبقات لكل منها وظيفة محددة. تستخدم طبقة التربة السفلية (Subbase Soil Layer) لضبط سطح الموقع ولتخدم كقاعدة لطبقة الوقاية. يجري في بعض تصاميم الأغطية وضع طبقة جمع الغاز أسفل طبقة التربة. تستخدم طبقة الوقاية (طبقة الغشاء الأرضي) لحصر حركة السوائل داخل الموقع ولمنع الإنطلاق العشوائي للغازات عبر الغطاء. تستخدم طبقة الدريناج (طبقة من الرمل والحصى أو من الجيونيت مزودة بفاصل من نسيج أرضي–Drainage Layer) لنقل مياه الأمطار ومياه ذوبان الثلوج التي تتقطر عبر مواد الغطاء بعيداً عن طبقة الوقاية، وكذلك لتقليص ضغط المياه على طبقة الوقاية. تستخدم الطبقة السطحية لضبط سطح الموقع، ولدعم النباتات التي تجري زراعتها بعد إغلاق الموقع. ويجري في بعض الحالات إحضار تربة زراعية ملائمة لنمو النباتات، أو تطوير خواص التربة المحلية بحيث تلائم

النمو النباتي المطلوب. يمكن لبطانة التغطية النهائية ألا تحتوي جميع الطبقات السابقة، إذ قد لا يكون فيها طبقة تجميع الغاز على سبيل المثال، ويمكن أن تعوض طبقة التربة السفلية عن هذه الطبقة.

يمكن لطبقة الطفل أن تستخدم أيضاً في بعض المواقع كطبقة دعم، إلا أن كثيراً من المشكلات يمكن أن تنشأ عن هذا الاستخدام، نذكر منها:

- يصعب رص طبقة الطفل على طبقة أساس ناعمة.
- يمكن للطفل المرصوص أن يطور الشقوق بفعل الجفاف.
- يمكن للطفل أن يتضرر بفعل التجمد.
- يمكن للطفل أن يتصدع بفعل الهبوط التفاضلي.
- من الصعوبة إصلاح طبقة الطفل في حالات تضررها.
- لا تقف طبقة الطفل عائقاً أمام حركة الغازات.

ينصح باستخدام غشاء أرضي واحد أو أكثر أعلى طبقة الطفل كطبقة وقاية في أغطية مواقع الردم الصحي. تستخدم بطانة الطفل الأرضي الاصطناعي كطبقة وقاية.

## 10-8- السيطرة على الغازات المنطلقة من مواقع الردم الصحي:

تستمر عمليات التفسخ اللاهوائي للقسم العضوي من النفايات الصلبة حوالي 100 سنة عند الترطيب المثالي، ويتم خلالها طرح 200-400 nm3 من الغاز العضوي من كل طن من النفايات الصلبة حيث يطرح منها 50% خلال السنوات الخمس عشرة الأولى، ويبين الشكل (29-8) مخطط انطلاق الغاز العضوي في المواقع التي تحوي 3 مليون طن من النفايات الصلبة. تتزايد شدة خروج الغاز باستخدام عمليات تدوير السائل الراشح.

إن الغازات الناتجة هي غازات رطبة تحتوي في بداية انطلاقها على نسبة عالية من غاز $CO_2$ (تحلل هوائي) ثم تنخفض هذه النسبة لترتفع مقابلها نسبة $CH_4$ (تحلل لاهوائي) إلى أن تستقر هذه النسب بحدود 40-60% من الميتان، وبحدود30-45% من غاز ثاني أوكسيد الكربون، وبحدود 0.1-0.3% من غاز كبريت الهيدروجين، وبكميات ضئيلة جداً من بعض الاتحادات التي تملك روائح مميزةً ثابتةً.

كما يمكننا تقدير حجم الغازات المنطلقة بفرض نسبة الجزء المتطاير من نسبة الجزء العضوي95% منها 50% كربون. يتحول نصف الكربون السابق إلى ميتان، والنصف الآخر إلى غاز ثاني أوكسيد الكربون.

لا توجد أية خطورة من إمكانية انفجار غاز الميتان نتيجة استهلاك الأوكسجين في عمليات التحلل اللاهوائي، إلا أنه هناك خطورة من عمليات التسرب الشاقولي والجانبي العشوائي الممكن للغازين الأساسيين السابقين، فبسبب كثافة غاز ثاني أوكسيد الكربون العالية فإن تسربه إلى الترب السفلية سوف يسبب قساوة المياه الجوفية نظراً لوجود صخور كربونات الكالسيوم والمغنيزيوم بتشكيله للهيدروكربونات المنحلة (البيكربونات)، فضلاً عن أنه قد يسبب خفض قيمة pH المياه الجوفية بسبب قابلية ذوبانه في الماء، أما غاز الميتان فإن تسربه الجانبي سوف يؤدي إلى تراكمه في المناطق القريبة من الموقع مما قد يسبب مشكلات خطرة؛ لذلك لا بد من تهوية مواقع الردم الصحي لتأمين خروج الغازات من هذه المواقع بإنشاء خلايا نفوذة من الحصى والحصى ضمن جسم الموقع بسماكة 30-50 cm، وبتباعدات 25-75 cm، وإنشاء آبار تهوية جانبية لمنع التسربات الجانبية للغاز.

**تشكل الغازات في مواقع الردم الصحي:**

يُعتقد أن تشكل الغازات في مواقع الردم الصحي يجري من خلال خمسة أطوار متسلسلة تقريباً:

1- الطور الأول (طور التنظيم الأولي-Initial Adjustment ): تخضع النفايات الصلبة الكائنة في الموقع في الطور الأول إلى عملية التحلل البيولوجي بفعل الظروف الهوائية وذلك نظراً لوجود كميات محدودة من الهواء في الفراغات بين عناصر

النفايات. وتُعد التربة المستخدمة كطبقة تغطية مرحلية (يومية) أو نهائية المصدر الأساس لكل الأحياء الهوائية واللاهوائية المسؤولة عن عمليات التحلل. يمكن أن تكون الحمأة الناتجة عن محطات الصرف الصحي، والمخلوطة مع النفايات الصلبة البلدية في مواقع الردم الصحي، وكذلك الرشاحة المعادة إلى سطح الموقع مصادر أخرى لهذه البكتريا.

2- الطور الثاني (طور التحول -Transition Phase): يستنفذ الأوكسجين الموجود ضمن الفراغات، وتبدأ بذلك الظروف اللاهوائية بالتأثير حيث تبدأ عمليات التحلل اللاهوائي ويجري إرجاع النترات والسولفات إلى غاز النتروجين وسولفيد الهيدروجين. يمكن مراقبة الظروف اللاهوائية عن طريق قياس جهد الأكسدة–الإرجاعية للنفايات. تؤمن قيمة جهد الأكسدة–الإرجاعية ضمن المجال millivolt 100-50 ظروفاً كافيةً للإرجاع الذي يقود لخفض تركيز النترات والسولفات. يبدأ إنتاج الميتان عند قيمة جهد الأكسدة الإرجاعية ضمن المجال millivolt 300-150. عند انخفاض قيمة جهد الأكسدة الإرجاعية تقوم أعضاء المستعمرات الميكروبية المسؤولة عن تحول المواد العضوية الكائنة في كتلة النفايات الصلبة إلى ميتان بعملية ثلاثية الخطوات، مترافقة بتحول المواد العضوية المعقدة إلى أحماض عضوية ومنتجات وسيطية.

تبدأ قيمة pH الرشاحة بالانخفاض في هذا الطور بفعل الأحماض العضوية المتشكلة، والتركيز المرتفع لثاني أوكسيد الكربون داخل الموقع.

3- الطور الثالث (الطور الحمضي -Acid Phase): تقود الفعالية الميكروبية التي بدأت في الطور السابق بتسريع إنتاج كميات كبيرة من الأحماض العضوية وكميات قليلة من غاز الهيدروجين. تبدأ العملية ثلاثية الخطوات بالتحولات الوسيطة الأنزيمية (الحلمهة) للمركبات ذات الكتلة الجزيئية العالية (كالبروتينات والأحماض النووية...الخ) إلى مركبات ملائمة للاستهلاك من قبل الأحياء الدقيقة كمصدر لطاقة هذه الأحياء ومصدر لكربونها الخلوي، ثم يجري التحول الميكروبي للعناصر السابقة إلى عناصر وسيطة ذات كتلة جزيئية منخفضة مثل حمض الخليك– Acetic Acid ( وكميات منخفضة من حمض الفولفيك-Fulvic Acid )، وأحماض أخرى أكثر تعقيداً.يكون غاز ثاني أوكسيد الكربون هو الغاز الأساسي المتشكل خلال هذا الطور،ويترافق ذلك مع كميات ضئيلة من غاز الهيدروجين. يطلق في المراجع الهندسية على الأحياء الدقيقة المسؤولة عن التحولات اللاهوائية السابقة اسم Acidogens or Acid Formers .

تنخفض قيمة pH الرشاحة في هذا الطور إلى أقل من 5 بفعل الأحماض العضوية المتشكلة، والتركيز المرتفع لثاني أوكسيد الكربون داخل الموقع، مما يقود إلى انحلال عدد من المركبات اللاعضوية في الرشاحة خلال الطور الثالث.

4- الطور الرابع (طور التخمر الميتاني -Methane Fermentation Phase): تسود في هذا الطور الزمرة الثانية من الأحياء الدقيقة التي تقوم بتحويل حامض الخليك وغاز الهيدروجين الناتجين في الطور السابق إلى $CH_4+CO_2$ .يجري في هذا الطور تشكل الأحماض بشكل مترافق مع الميتان، إلا أن التشكلات الحمضية تنخفض بشكل محسوس في هذا الطور.

تصل قيمة pH الرشاحة في هذا الطور إلى القيمة المعتدلة 8.0-6.8 .

تسمى الأحياء الدقيقة المسؤولة عن التحولات اللاهوائية السابقة (Methanogenic)، ويطلق عليها في المراجع الهندسية اسم (Methanogens or Methane Formers) .

5- الطور الخامس (طور النضج -Naturation Phase): يجري هذا الطور بعد تحول الجزء الأكبر من المادة العضوية القابلة للتفسخ المتوفرة إلى $CH_4+CO_2$ في الطور الرابع. تستمر في الطور الخامس عملية هجرة الرطوبة خلال النفايات الصلبة، ويستمر تحول جزء آخر من المادة العضوية القابلة للتفسخ وتنخفض شدة الغازات المنطلقة بسبب خروج كثير من المتحولات الوسطية مع الرشاحة خلال الأطوار السابقة. وقد جرى ملاحظة خروج كميات قليلة من النتروجين والأوكسجين مع الغازات المنطلقة خلال هذا الطور أثناء مراقبة المواقع المغلقة.

تعتمد استمرارية كل طور من الأطوار السابقة على توزيع العناصر العضوية ضمن الموقع وعلى رطوبة النفايات الصلبة ودرجة رصها ونسبة C/N ...الخ.

**أنظمة السيطرة على الغازات المنطلقة من مواقع الردم الصحي:**

تهدف عملية السيطرة على حركة الغازات إلى:

-خفض الانبعاثات الغازية إلى الغلاف الجوي.

-خفض إطلاق الروائح إلى الحد الأدنى.

- خفض الهجرة الجانبية للغازات إلى الحد الأدنى.

-السماح باسترجاع الطاقة من الميتان المنطلق مع الغازات.

يمكن تصنيف أنظمة السيطرة على الغازات المنطلقة من مواقع الردم الصحي إلى أنظمة سلبية وأخرى فعالة. عندما يكون إنتاج الغازات محدوداً فإن النظام السلبي لن يكون فعالاً؛ وذلك لأن الانتشار الجزيئي (Molecular Diffusion ) سيكّون الميكانيزم السائد لحركة هذه الغازات، ولن يكون مهماً في كل الأحوال السيطرة على انبعاثات الميتان القليلة في غاز الموقع.

يمكن أن تكون عملية السيطرة على المركبات العضوية الطيارة VOC من أهم المؤشرات المحددة لنوعية تجهيزات كل من النظامين السابقين.

يجري التخلص من الغازات المتجمعة بإطلاقها بشكل منظم في الهواء الخارجي، أو بحرقها للتخلص من غاز الميتان والمركبات العضوية الطيارة الموجودة فيها، أو يجري استخدام هذه الغازات لإنتاج الطاقة بالاستفادة من غاز الميتان الموجود فيها.

أنظمة السيطرة السلبية على الغازات المنطلقة من مواقع الردم الصحي:

يكون ضغط الغازات المتشكلة في الموقع هو القوة المحركة لها في أنظمة السيطرة السلبية على الغازات.

أنظمة السيطرة الفعالة على الغازات المنطلقة من مواقع الردم الصحي:

يمكن السيطرة على الهجرة الجانبية للغازات باستخدام آبار وخنادق محيطية لاستخلاص الغاز تعمل تحت تأثير ضغط سلبي (Vacuum) . ويجري عادةً استخدام كثير من طرائق السيطرة الفعالة على الغازات نذكر منها:

1- استخدام الآبار المحيطية المخصصة لاستخلاص الغازات وللسيطرة على الروائح المنبعثة من الموقع:

2- استخدام الخنادق المحيطية المخصصة لاستخلاص الغازات:

3- استخدام آبار الحقن الهوائية المحيطية (نظام الستارة الهوائية):

4- أنظمة السيطرة الفعالة على الغازات المنطلقة من مواقع الردم الصحي باستخدام آبار الاستخلاص الشاقولية وخنادق الاستخلاص الأفقية:

## 8-11- استثمار مواقع الردم الصحي بعد إغلاقها:

بعد انتهاء المدة التصميمية لموقع الردم الصحي يتم إغلاقه، وتختلف عمليات إغلاق الموقع بحسب طبيعة استثمار الموقع بعد إغلاقه، ويتبع ذلك التغيرات التي تطرأ على النفايات الصلبة المكبوسة في خلايا الردم الصحي الناتجة عن نشاط البكتريا الهوائية مستفيدة من الأوكسجين الكائن في الخلايا المكبوسة، وعن نشاط البكتريا اللاهوائية التي يبدأ نشاطها بعد استنفاذ الأوكسجين المحبوس داخل الخلايا. وتعد طبقة الغطاء الترابية المصدر الأساسي للبكتريا المسؤولة عن الانحلال والتفكك البيولوجي. تعتمد شدة التفكك البيولوجي على التركيب المورفولوجي للنفايات الصلبة ونسبة الرطوبة ودرجة الرص.

ترتفع حرارة النفايات الصلبة في السنة الأولى نتيجة العمليات البيوحرارية إلى أكثر من $30^{O}C$ ، وتظهر الانبعاثات الغازية الشديدة بما فيها الميتان، وبالتالي فإن بداية استغلال الموقع بعد إغلاقه يجب ألا تقل عن سنة واحدة. تسحب النفايات الصلبة في مدة3-5 سنوات الرطوبة بشكل شديد من الطبقات المعزولة، لذلك يجب أن يتم ترطيب المواقع في الأوقات الجافة من السنة للمساعدة على إتمام عمليات التحلل.

بعد 20-15 سنة ستكتسب النفايات ضمن الخلايا المعزولة التي تقع على عمق 2-1 m خواص الترب الزراعية، ولم يثبت تحلل المواد العضوية الحاوية على السيلولوز (ورق وقماش) والمواد البلاستيكية والمطاط خلال هذه الأوقات، أما بالنسبة للخلايا العميقة فإن التحلل الكامل لفضلات الطعام والورق قد يستمر من 100-50 سنة، وبالتالي يستمر إطلاق غازات التحلل اللاهوائي لأوقات طويلة بعد إغلاق الموقع.

يجب أن يحظى الموقع بعد إغلاقه بمراقبة مستمرة. يتم عادةً ملأ أماكن الهبوط عند حدوثها بالتربة الزراعية، وقد بينت الدراسات التي أُجريت على مواقع مختلفة في العالم أن 90% من الهبوطات المتوقعة لموقع الردم الصحي تحدث خلال السنوات الخمس الأولى من إغلاقه. تجري دراسة الهبوطات المتوقعة لمنسوب سطح موقع الردم الصحي قبل التفكير بعمليات استثماره. ويرتبط الهبوط المتوقع بدرجة الرص الابتدائية لخلايا النفايات الصلبة، وبنوع هذه النفايات وخواصها، وبالعمق أو الارتفاع الكلي لخلايا الردم الصحي .

يمكن استخدام مواقع الردم الصحي بعد إغلاقها كمناطق تشجير، ومنتزهات، وملاعب، وساحات رياضية، ومراع وحدائق ومزارع، ومستودعات أو كراجات مفتوحة ...إلى غير ذلك. تشكل سماكة طبقة العزل النهائية لموقع الردم الصحي تبعاً لطبيعة الاستثمار المستقبلية للموقع.

## 12-8- إيجابيات طريقة الردم الصحي في معالجة النفايات الصلبة وسلبياتها:

يجري في كثير من الأحيان اعتماد طريقة الطمر الصحي في معالجة النفايات الصلبة نظراً للمحاسن الكثيرة لهذه الطريقة، والتي نذكر منها:

1-تعدّ طريقة الردم الصحي من أكثر الطرائق التقليدية في معالجة النفايات الصلبة اقتصاداً، وخصوصاً في ظروف مشابهة لظروف بلادنا نظراً لتوافر المساحات الكافية والواسعة والرخيصة والملائمة لإقامة مواقع الردم الصحي، ونظراً لانخفاض كلف إنشاء هذه الطريقة وتشغيلها مقارنةً مع الطرائق الأخرى.

2-يمكن بهذه الطريقة استقبال جميع عناصر النفايات الصلبة البلدية، أي أنه يمكننا الاستغناء عن عمليات فرز المواد المرفوضة وفصلها، كما في الطرائق التقليدية الأخرى.

3-تُعد طريقة الردم الصحي طريقةً مرنةً للمعالجة، حيث يمكن استيعاب أحجام متفاوتة من النفايات الصلبة.

4-يجري التخلص من النفايات الصلبة بهذه الطريقة بشكل نهائي ،مع إمكانية تنفيذ هدف محلي للردم الصحي.

أما سلبيات هذه الطريقة فنذكر منها:

1-زيادة تكلفة طريقة الردم الصحي مع الزمن بسبب متطلبات قوانين السيطرة البيئية المتزايدة وبسبب أسعار الأراضي، حيث تعاني المؤسسات المسؤولة عن النفايات الصلبة من إيجاد مساحات كافية لهذه المواقع ما لم تكن مسافة النقل إليها كبيرة.

2-ضرورة التقيد بتنفيذ عملية الردم الصحي بمقاييسه الدقيقة حتى لا تتحول هذه العملية إلى ردم مكشوف.

3-اعتراض السكان القريبين من مواقع الردم الصحي على إقامة هذه المشاريع لما لهذه المشاريع من مشكلات مرتبطة بالضجيج والغبار والنفايات المتطايرة...الخ.

4-ضرورة المراقبة والإصلاح المستمرين للموقع حتى بعد إغلاقه بسنين طويلة نتيجة الهبوطات الممكنة للموقع.

5-تعارض مواقع الردم الصحي مع خطة التوسع العمراني للمناطق السكنية.

6-خطر انتشار غاز الميتان حتى بعد إغلاق الموقع بسنين طويلة جداً.

## 4-9- حقول تحويل النفايات الصلبة إلى كومبوست:

تتشابه مهمة حقول تحويل النفايات الصلبة إلى كومبوست –كما ذكرنا سابقاً– مع مهمة الطبلات البيوحرارية المستخدمة في مصانع معالجة النفايات الصلبة. تشكل الأكوام على ساحات مستوية كتيمة مرصوفة ببلاطات بيتونية أو إسفلتية. تحاط قطاعات تشكيل الأكوام بسور شبكي بارتفاع 3m بأبعاد فتحات الشبك 40 x 40 mm . تشكل الأكوام بحيث توازي حركة الرياح السائدة في المنطقة وذلك لتعريضها للهواء بشكل جيد. غالباً ما تكون حقول التحويل قريبة من مواقع الردم الصحي وذلك لتأمين التخلص من النفايات الضخمة غير المتخمرة الناتجة عن المناخل. ويمكن تصميم هذه الحقول متكاملة مع مواقع الردم الصحي بغية تخفيض مساحة موقع الردم الصحي، حيث تنخفض عند ذلك مساحة مواقع الردم الصحي بحدود 6-4 مرات عن مساحة الموقع في حالات عدم وجود حقول التحويل. عند وجود حقول التحويل مع مواقع الردم الصحي متكاملة تجري دراسة أنظمة الإمداد المائي، وأنظمة التزويد بالكهرباء، وأنظمة تدوير الراشح سوياً.

يمكن أن تلحق حقول التحويل بتجهيزات حرق صغيرة أو مواقع ردم صحي محلية صغيرة وذلك في حالات عدم توافر مواقع الردم الصحي القريبة.

تصنف النفايات الصلبة بحسب صناعة الكومبوست إلى:

1- عناصر ضرورية لإنتاج الكومبوست: وهي المواد العضوية سهلة التحلل؛ كفضلات الطعام وبقايا الحدائق.

2- عناصر مقبولة لإنتاج الكومبوست: كالورق والمواد الخام صغيرة الحجم.

3- عناصر قابلة للاسترجاع: كالورق والزجاج والمعادن والبلاستيك والقماش...الخ، وأغلب هذه العناصر هي مرفوضات لا تفيد في عملية تحول النفايات الصلبة إلى كومبوست، فضلاً عن أنها تسيء إلى الكومبوست المنتج.

تتكون منتجات مصانع تحويل النفايات الصلبة إلى كومبوست من المواد الآتية:

1- مواد الذبال(الكومبوست): وهي مواد يمكن استخدامها كمحسنات للتربة نتيجة إمكانية تخفيفها للترب الثقيلة وإمكانية تحسينها لتركيب التربة الرملية الخفيفة ومساعدتها في زيادة قدرة التربة على احتفاظها بالماء وتعميق جذور النباتات في التربة، فضلاً عن تقديمها العناصر الغذائية للتربة (K, P , N).

2- مواد مسترجعة يمكن إعادة استخدامها كالزجاج والمعادن ...الخ .

3- مواد مرفوضة يجري التخلص منها بالردم غالباً .

**عمليات تحويل النفايات الصلبة إلى كومبوست:**

يمكن أن تتم عمليات تحويل النفايات الصلبة إلى سماد–كومبوست بطريقتين:

a- التحلل البيوحراري اللاهوائي: تقوم بهذا التحلل البكتريا اللاهوائيةAnaerobic Bacteria، وقد استخدمت هذه الطريقة قديماً إلا أنه ورغم تكاليفها المنخفضة نسبياً لم تجد انتشاراً واسعاً نتيجة المدة الزمنية الطويلة اللازمة لإتمام هذه العملية إذ تستغرق من 12-4 شهراً. تحتاج هذه الطريقة إلى مساحات واسعة جداً لتنفيذ عملية المعالجة، يضاف إلى ذلك تلوث الهواء بالغازات ذات الروائح الكريهة الناتجة عن عمليات التحلل اللاهوائي، وكذلك انتشار الذباب واحتمال تلوث المسطحات المائية بمياه الرشح الناجمة عن هذه الأحواض.

b- التحلل البيوحراري الهوائي: تجري عملية التحلل البيوحراري الهوائي للمادة العضوية نتيجة نشاط البكتريا الهوائية Aerobic Bacteria القادرة على إصدار كمية محددة من الحرارة خلال العمليات البيوكيميائية للتبادل المادي. توجد الأوساط الميكروبية(الميكروفلورا) المطلوبة للعملية البيوحرارية في كتلة النفايات بالكمية المطلوبة. وقد لاقت هذه الطريقة انتشاراً واسعاً نتيجة التحلل السريع نسبياً للنفايات الصلبة (من يومين حتى عدة أسابيع)، حيث ترتفع الحرارة إلى حد كفيل بالقضاء على الجراثيم المؤذية للإنسان وبيوض الديدان والحشرات. ويبين الجدول (2-9) نقاط الموت الحراري لعدد من الأحياء الدقيقة المؤذية (Die-

off of Pathogenic Organisms)، والتي تؤكد إمكانية القضاء عليها في ظروف التحلل البيوحراري الهوائي. تتميز عمليات التحلل الهوائي بأنها عمليات مناسبة من الناحية الصحية، حيث لا تنتج عن هذه العمليات الروائح المزعجة كما هو الحال في عمليات التحلل اللاهوائي وذلك إذا تمت المحافظة على الظروف الهوائية لهذه العمليات.

وتتم المحافظة على الظروف الهوائية لعمليات التحلل الهوائي عن طريق:

1- توفير الرطوبة المناسبة لهذه العمليات: تنخفض سرعة عمليات التحلل الهوائي عند رطوبة نسبية أقل من 40%، وتتوقف عند رطوبة نسبية أقل من 20% ، بينما تتحول عمليات التحلل الهوائي إلى عمليات لاهوائية عند زيادة الرطوبة النسبية عن55%. ولذلك فإن انخفاض الرطوبة النسبية عن40% يضطرنا إلى ترطيب النفايات الصلبة أثناء المعالجة عن طريق رشها بالماء، أما ازدياد الرطوبة النسبية عن55% فيضطرنا إلى تقليب النفايات الصلبة بهدف تخفيض رطوبتها أثناء المعالجة. إن النفايات الصلبة البلدية لبلدان شرق البحر الأبيض المتوسط تحتوي على رطوبة نسبية أولية ضمن الحدود المرغوبة في عمليات التحلل الهوائي، ورغم ذلك فإن عمليات التحلل الهوائي تحتاج إلى رطوبة إضافية نتيجة الحرارة المرتفعة لهذه العمليات،حيث ترتفع حرارة النفايات الصلبة الخاضعة للمعالجة في اليومين الأولين بفعل بكتريا الميزوفيل Misophilic التي تقوم بأكسدة الكربون الموجود إلى ثاني أكسيد الكربون، ثم تستمر درجة الحرارة بالارتفاع لتنشط بكتريا الثيرموفيل Thermophilic، والتي تُعد بكتريا محبة للحرارة العالية، وبارتفاع درجة الحرارة في وسط المعالجة يتم القضاء على البكتريا المؤذية للإنسان، إلا أن عمليات التحلل الهوائي تتوقف عند درجة حرارة أعلى من 70 $^{o}$C.

2- توفير الأوكسجين اللازم لهذه العمليات: إن نفاذ الأوكسجين أثناء عمليات التحلل الهوائي للنفايات يقود إلى تحول عمليات التحلل هذه إلى عمليات تحلل لاهوائي مما يؤدي إلى الانخفاض السريع في درجة الحرارة، وإلى انطلاق الروائح الكريهة؛ لذلك لا بد من تأمين الهواء اللازم لهذه العمليات عن طريق تقليب النفايات أثناء عمليات المعالجة، أو عن طريق إمداده إلى طبلات التخمر الحراري.

3-نسبة الكربون إلى النتروجين C:N :تساعد النسبة المثالية لهذين العنصرين في عملية التحول السريع للنفايات الصلبة إلى كومبوست، حيث يُعد الكربون مصدر الطاقة للبكتريا التي تقوم بعمليات تحلل النفايات الصلبة، بينما يُعد النتروجين أساساً لتكوين خلايا هذه البكتريا. تُعد فضلات الطعام المصدر الأساسي للنتروجين، بينما تُعد النفايات الورقية والفحم المصدر الأساسي للكربون. تتراوح النسبة المثالية للكربون إلى النتروجين من 30:1 وحتى 35:1 .إن ازدياد هذه النسبة عن الحدود المثالية سيؤدي إلى ازدياد الزمن اللازم لعملية التحلل مما يفرض ضرورة إضافة مصادر غنية بالنتروجين؛ كالحمأة الناتجة عن معالجة مياه الصرف الصحي والتي تملك نسبةً عالية للكربون إلى النتروجين(6:1 )، أما بنقصان هذه النسبة عن الحدود المثالية فإن الآزوت الزائد سوف يطرح على شكل غاز نشادر مؤدياً إلى ظروف غير مستحبة مما يفرض ضرورة إضافة مصادر غنية بالكربون كالورق والقش. تكون النسبة C:N للنفايات الصلبة البلدية لبلدان شرق البحر الأبيض المتوسط في الغالب ضمن الحدود المقبولة السابقة.

تقسم عملية التخمر البيوحراري الهوائي شرطياً إلى ثلاثة أطوار:

الطور الأول: يتميز هذا الطور بالتكاثر السريع جداً للأحياء الدقيقة الميزوفيلية، حيث تُعد درجة الحرارة المثالية 20- 35$^{o}$C، وتُعد الاتحادات العضوية سهلة التحلل الموجودة أساساً في فضلات الطعام (الكربوهيدرات، والأحماض العضوية، والبروتينات) مصدر الطاقة الأساسي للبكتريا. خلال النشاط الحياتي لهذه الأحياء يجري إصدار طاقة حرارية تساعد على تسخين الكتلة المتخمرة حتى 50$^{o}$C. يمكن للطور الأول أن يستمر من يوم واحد إلى عدة أيام تبعاً للظروف المحيطة.

الطور الثاني: يشكل الرفع الحراري السابق ظروفاً ملائمةً لتطور الأحياء الدقيقة الثيرموفيلية. يزداد إطلاق الحرارة (ترتفع درجة حرارة المادة الخاضعة للتخمر حتى 50-70$^{o}$C)، وتتسارع عملية تحلل المواد العضوية نتيجة النشاط الحياتي لهذه البكتريا.

يستمر الطور الثاني من شهرين إلى ثلاثة أشهر. يمكن للطور الثاني أن يبدأ خلال يومين حتى ثلاثة أيام، حيث ترتفع درجة الحرارة حتى 55-60°C، بينما يكتمل هذا الطور في أكوام ساحات التجريع.

الطور الثالث: يشير الهبوط البطيء لدرجة الحرارة إلى استخدام الاتحادات العضوية سهلة التحلل. تنتقل الأوساط الميكروية الثيرموفيلية إلى الحالة البوغية وتثبط جزئياً، بينما تنشط الأوساط الميكروية الميزوفيلية من جديد بفضل امتلاكها لأنظمة تخمير قوية ومتعددة تساعدها على القيام بعملية تحليل الاتحادات العضوية الأكثر ثباتاً.

تتفكك المواد العضوية لدى إزالة خطر النفايات المنزلية لتشكل الاتحادات الذبالية ذات التأثير الكبير في نوعية الكومبوست الناتج. ينخفض تركيز المادة العضوية في المادة الخاضعة للتخمير خلال كامل دورة التخمير البيوحراري الهوائي بمقدار 18- 26% تبعاً لمدة دورة التخمير البيوحراري الهوائي ولفعالية العملية البيوحرارية، أما القسم المتبقي من المادة العضوية فيتحلل في ساحات التكويم.

مسألة رقم (2):

احسب حجم الهواء اللازم لأكسدة 1 ton من النفايات الصلبة ذات الصيغة الكيميائية التقريبية $C_{50}H_{100}O_{40}N$ أكسدة كاملة لتحويلها إلى كومبوست.

الحل:

$$C_{50}H_{100}O_{40}N + 54.25O_2 \rightarrow 50CO_2 + 48.5H_2O + NH_3$$

$$...1354.....1736.....17$$

$$...1000.....X.....Y$$

وبالتالي: $X = 1282kg/ton$ و $Y = 12.56kg/ton$

$$NH_3 + 2O_2 \rightarrow HNO_3 + H_2O$$

$$17.....64$$

$$12.56...Z$$

وبالتالي: $Z = 47.3kg/ton$

كمية الأوكسجين اللازمة:

$$1282 + 47.3 = 1329.3kg/ton$$

كمية الهواء اللازمة:

$$M = \frac{1329,3.100}{23,15} = 5742kg/ton$$

حجم الهواء اللازم:

$$V = \frac{5742}{1.2928} = 4442m^3/ton$$

**مسألة -3-:**

احسب وزن الهواء اللازم لحرق طن واحد من النفايات الصلبة ذات الصيغة الكيميائية التقريبية $C_{50}H_{100}O_{40}N_4S$ وذلك حتى الوصول إلى احتراق كامل للنفايات، بافتراض تحول كامل الكربون إلى غاز ثاني أوكسيد الكربون.

الحل:

1- حساب الوزن الجزيئي للصيغة :

$$50 . 12 +100. 1+16. 40+14. 4+32. 1 =1428$$

2- حساب النسبة المئوية لتوزيع العناصر الأساسية في كتلة النفايات الصلبة:

$$C = \frac{50.12}{1428}.100 = 42\%$$

$$H = \frac{100.1}{1428}.100 = 7\%$$

$$O = \frac{16.40}{1428}.100 = 44{,}8\%$$

$$N = \frac{4.14}{1428}.100 = 4\%$$

$$S = \frac{1.32}{1428}.100 = 2{,}2\%$$

3-حساب الهيدروجين الحر غير المرتبط : الهيدروجين الكلي = الهيدروجين الحر + الهيدروجين المرتبط (Hydrogen in bound) .

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$$

..4.....32.....36

..1.....8.....9

فالهيدروجين الحر يحسب بالشكل الآتي: $H_{Free} = 7 - (44{,}8 / 8) = 1{,}4\ \%$

4- حساب كمية الهواء المطلوبة لحرق طن واحد من النفايات حرقاً كاملاً:

-احتراق الكربون : $\frac{42}{100}.10^3.11{,}52 = 4838{,}4 kg/ton$

-احتراق الهيدروجين الحر : $\frac{1{,}4}{100}.10^3.34{,}56 = 484 kg/ton$

-احتراق الكبريت: $\frac{2{,}2}{100}.10^3.4{,}32 = 95{,}04 kg/ton$

-الكمية الكلية :

4838,4+484+95,04=5417,44kg/ton=5417,44/1,2928=4190 $m^3$/ton