

**REHABİLİTE EDİLMİŞ ALANLARDA
DEPOLAMA SAHASI GAZI VE SIZINTI
SUYU YÖNETİMİ****4.1. Giriş**

Düzenli depolama sahalarında depolanmış atıklarda özel bakteriler ile ayrışan moleküllere sahip organik maddeler bulunmaktadır. Bu ayrışma prosesinde **biyogaz** ya da depolama sahası gazı (LFG - Landfill Gas) adı verilen bir gaz karışımı ve kirletici madde açısından zengin olup çoğunlukla yağmur suyu infiltrasyonu vasıtasıyla atıkların filtreden geçirilerek elde edildiği bir sıvı ağığa çıkmaktadır.

Atıkların içerisinde bulunan organik maddenin kimyasal ve biyolojik bozunması sonucu depolama sahası gazı oluşmaktadır. Depolama sahası gazının özel bileşimi, aşağıda da belirtilen birçok etkene bağlı olarak sürekli değişmektedir:

- Atık bileşimi;
- Atığın çevresel şartları;
- Atık depolama süresi ve koşulları.

Açıkça görüyoruz ki, (organik, plastik, inert madde vs gibi) farklı türdeki atıklar, oluşan depolama sahası gazının türünü ciddi anlamda etkileyecektir. Çok yüksek seviyede organik madde bulunması, verimliliğin artmasına yol açar; öte yandan, inert maddenin ya da inhibitör kimyasalların içeriği böyle bir durumu ciddi bir şekilde kısıtlar. Maddenin **boyutu** önemli bir rol oynamaktadır; küçülen boyut depolama sahası gazı üretimine yönelik şartların daha iyi hale gelmesini sağlarken, maddelerin biyoreaktif yüzeyinin artmasına neden olmaktadır. Bu da; atıkların daha fazla sıkıştırılmasına, boşluk oranının azalmasına ve kütle yoğunluğunun artmasına, böylece nem ve bakteri yayılımının ve depolama sahası gazı aktarımının daha da azalmasına yol açacaktır. Atık depolanmadan önce gerçekleşen ön arıtma süreçleri, boyutu önemli ölçüde etkilemektedir; örneğin, boyut küçültme işlemi, boyutun küçülmesine ve maddenin karışmasına yol açmaktadır.

Sızıntı suyu, *düzenli depolama sahasında bulunan katı atıklar içerisinde sızan ve prosesteki çözünmüş ya da askıda maddelerden çıkan sıvıdır*. Sızıntı suyu ve gaz emisyonlarının kontrol edilememesi durumunda katı atık depolama sahalarının çevre üzerinde ciddi etkileri olabilir. Düzenli depolama sahasında oluşan sızıntı suyunda, zemine sızabilecek yüksek miktarda organik ve inorganik kirletici maddeler bulunmaktadır.

Sonuç itibarıyla, düzenli depolama sahası yönetimi ile öncelikle sızıntı suyu oluşumunun en aza indirilmesine, daha sonra ise sızıntı suyunun toplanması ve taşınması için kullanılacak sisteme odaklanılmaktadır.

Genelde sızıntı suyunun topraktan sızması, biyolojik bozunmanın nihai ürünlerinin de taşınmasını sağlayan bir drenaj sistemi ile beraber çalışan düşük geçirgenlik bariyerleri tarafından kontrol edilmektedir. Bariyerler tesis içinde bulunan sıkıştırılmış killi toprak tabakalarından oluşmaktadır. Ayrıca killi toprak ile eşleştirilebilen ya da bağımsız eleman olarak kullanılabilen sentetik geomembranları kullanmak suretiyle yönetmeliklere uygun hareket etmek mümkündür.

4.2 Depolama sahası gazı yönetimi

4.2.1 Depolama sahası gazı bileşimi ile temel bileşenleri

Çevresel faktörler arasında **nem** önemli bir rol oynamaktadır; nem oranının (belli limitler dâhilinde) artması durumunda, depolama sahası gazı oluşumunda da bir artış kaydedilmektedir. Aslında çok fazla suyun olması; birçok nedenden dolayı biyolojik bozunma prosesi açısından yararlı etkilere yol açmaktadır:

- mikroorganizmaların aktivitesini artırmaktadır;
- katı-sıvı arayüzünü geliştirerek mikroorganizmaların ve besin öğelerinin daha hızlı yayılmasını sağlayan bir vektör olarak hareket etmektedir.

Düşük nem (%30-40) organik maddenin bozunmasına yol açacak biyokimyasal tepkimeler için elverişli şartlar sunmamaktadır; öte yandan, doygunluk (veya daha da kötüsü “taşkın”) şartları; gerek gazın oluşmasını gerekse bu gazın taşınabilmesini engellemektedir. Atıkta suyun bulunmasının nedenleri aşağıda belirtilmiştir:

- endojen bir faktörün olması (örneğin; mutfak ve bahçe atıklarında çok yüksek düzeyde su bulunmaktadır);
- yağmur suyu sızıntısı/sızıntı suyu;

- yüzey suyu ve yeraltı suyu akışı;
- sızıntı suyunun (gerektiğinde) resirkülasyon işlemine tabi tutulması

İlk ifadede; atık bileşimi ile toplama yöntemleri konusuna değinilmektedir. Genellikle düzenli depolama sahasına gönderilen atık doymamış atık olup kapiler doygunluk seviyesine kadar su emme kapasitesine sahiptir, bu seviyenin üzerine çıkıldığında ise sızıntı suyu oluşmaktadır.

Atıkların günlük muhafazası ve yüzeysel akış suyunun uygun bir şekilde taşınması gibi düzenli depolama sahası yönetimi ile ilgili yöntemler, harici girdileri ciddi anlamda etkilemektedir.

Yukarıda da bahsedildiği gibi, düzenli depolama sahasında atık ayrışma prosesinin ilk aşaması, organik maddelerin, bakteri gibi mikroorganizmalar tarafından daha ufak bileşenlere ayrıldığı **biyolojik bozunma** aşamasıdır.

Biyolojik bozunma üç safhadan oluşmaktadır:

- aerobik safha
- anaerobik asit safhası
- anaerobik metanojenik safha

Aerobik safha, oksijenli ortamlarda organik kirleticilerin mikroorganizmalar tarafından daha ufak bileşenlere ayrıldığı ilk safhadır; oksijen, atmosferden, depolama sırasında yerleşen havadan, kapatıldıktan sonra nüfuz eden havadan ve infiltrasyon suyunda çözünen havadan alınmaktadır. Bu proses, fiilen atık toplama ve (sonraki) ön arıtma fazı sırasında başlayıp her durumda oksijen oluşana kadar devam etmektedir.

Söz konusu proses, mutfak ve bahçe atıklarından oluşturulan ev tipi kompostlar ile ziraî atıklardan veya organik artıklardan oluşturulan ziraî/sınaî tip kompostlarda kullanılan aynı prostedir. Aerobik proste 70°C sıcaklıkta dahi elde edilebilen yüksek seviyede ekzotermik (ısı veren) bir tepkime ortaya çıkmaktadır.

Atığın depolanarak sıkıştırıldığı durumlarda bu proses birkaç saat/gün sürebilir; aksi takdirde atık kalıntılarının kontrol edilememesi ve hava sirkülasyonunun devam etmesi halinde bu proses aylarca sürebilir. Bu oksidasyon aşamasında bir CO₂ oluşum ve emisyon prosesi yer almaktadır.

Anaerobik (asit) safha: Oksijenin kullanılabilirlik düzeyinin azalması ve aerobik prosesin imkânsız hale gelmesi durumunda bu safha gerçekleşmektedir. Bu bağlamda aerobik mikroorganizmalar, diğer oksijen bileşiklerini kullanmayı tercih etmektedir. Bu safhada

karbondioksit oluşmaktadır. Aerobik proses ile karşılaştırıldığında daha az ısı enerjisi ve çok miktarda kısmen parçalanmış organik madde oluşmaktadır. Kısmen parçalanmış maddenin büyük bir çoğunluğu organik asitlerden oluşmaktadır. Bu asitler sızıntı suyunun içerisinde bulunmaktadır. Birkaç hafta ya da ay sürebilecek bu safhada bir CO₂ oluşumu ya da emisyonu kaydedilmektedir.

Anaerobik metanojenik safha: Son olarak bozunma işlemi devam etmekte ve organik madde; metan ve CO₂'ye dönüşmektedir; bu yüzden oksijen tamamıyla tüketildiğinde ve anaerobik bir ortamda üreyen metanojenik bakterileri için elverişli koşullar oluştuğunda anaerobik safha etkin hale gelmektedir.

Doğru koşullar sağlandığında metanın yüzdelik oranı biyogazın %60'ı oranına kadar artabilir. Ayrıca aerobik safhada ortaya çıkan tepkimeden herhangi bir şekilde daha düşük olan son derece egzotermik tepkime ise bu safhada görülmektedir. Bu aşama, genellikle atık depolama sürecinden sonraki birkaç aylık dönemden sonra başlayıp onlarca yıl devam edebilir; ilk yıllarda azami düzeyde verim gerçekleşmekle beraber organik madde tamamıyla parçalanana değin ağır bir seyir göstererek azalır. Açıkça görülüyor ki biyokimyasal proseslerin var olmasını sağlayacak kimyasal-fiziksel şartlar elde edilene kadar bu safha devam edebilir. Bu safha tamamıyla sıfır seviyesine kadar düşmektedir. Atıklar; zaman zaman atık depolama işleminden sonra yıllarca, örneğin, nemsiz ortamda bozulmamış halde kalabilir ya da çok az bozulmuş olabilir.

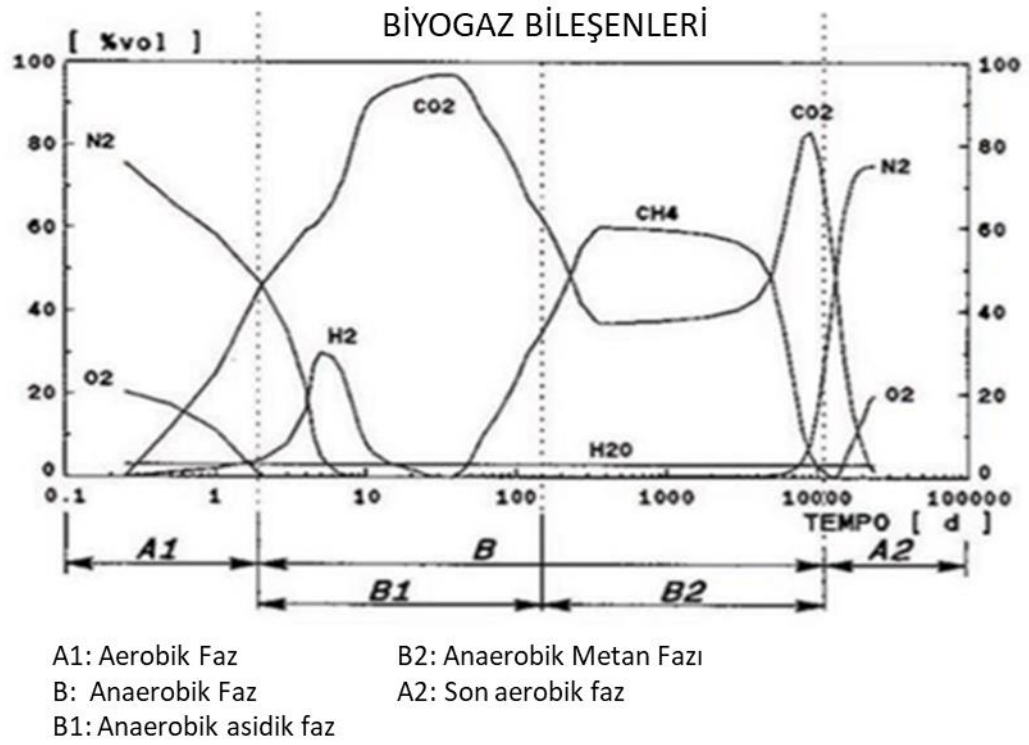
Şekil 4.1'de depolama ortamında nem görmediği için 30 yıl sonra dahi aynı şekilde kalan bir kağıt bilet görülmektedir.



Şekil 4.1. 30 yıl boyunca saklanan Kâğıt Atık. Kaynak: ASET Spa, 2016 Ekim

Farklı yönetim yöntemleri, atık ayrıştırma aşamalarını ciddi bir şekilde etkilemektedir; örnek vermek gerekirse, toplandığı halde işlenmemiş çok miktarda atık, kontrolsüz çöplüklerde yeterli bir şekilde kapatılmadığı zaman aerobik prosesin sonraki aşamaları için uygun şartların artık yerine getirilememe riski vardır.

1992 yılında A. Damiani ile M. Gandolla tarafından yayınlanan bir makalede yer alan ve aşağıda gösterilmiş olan grafik; yönetimli ve kontrollü bir depolama sahasında atık “fermentasyonu”nun muhtelif aşamaları sırasında ortaya çıkan gaz karışımının bileşimindeki (gösterge) trendin nasıl belirlendiğini ana hatları ile yansıtmaktadır.



Şekil 4.2. Bir Düzenli Depolama Sahasında yer alan biyogaz bileşim prosesi. Kaynak: Damiani L., Gandolla M., 1992, Biogas management in controlled landfills, Istituto per l'Ambiente.

Grafikten de görüleceği üzere **tipik depolama sahası gazı**'nın makro bileşenleri ile hacim yoğunlukları şu şekildedir:

- metan (CH₄) %30-50
- karbondioksit (CO₂) %35-70
- Oksijen (O₂) %3-5
- Azot (N₂) %10-15
- su buharı %0-5

Tüm bu gazlar kokusuzdur. Daha düşük oranda bulunan (ppm [milyonda bir birim] veya mg/m³ olarak ölçülebilen) bileşenler ise, belirgin ve özel koku özellikleri bulunan hidrojen sülfür (**H₂S**) ve amonyaktır (**NH₃**).

Depolama sahası gazı; toplanan atığın türüne, tesis yönetimi ve atık depolama süresine bağlı farklı yüzdelik oranlarda bulunan gazlardan oluşmaktadır. Ancak kolaylık açısından, düzenli depolama sahası yönetiminde %50 oranında metan içeriği olan biyogaz (LFG₅₀) referans olarak gösterilmektedir.

Depolama sahası gazında bulunup atığın içerisinde gerçekleşen biyokimyasal tepkimeler sonucu veya doğrudan atığın içerisinde bulunan sentetik maddelerden dolayı daha başka birçok gaz (Uçucu organik bileşikler (VOCler), polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAHlar), metan olmayan hidrokarbonlar gibi) da oluşmaktadır. Bu gazların bir kısmı toksik olduğu için hem tesiste çalışan personelin hem de çevre ve insan sağlığının korunması açısından yeterli düzeyde izlenmelidir.

Parlayıcı bir gaz olan metan gazı konusunda özel ihtimam gösterilmelidir. Metan yakıt olduğu için oksitleyici (havada bulunan oksijen) ile bir tetikleyicinin varlığında yanma işlemi gerçekleşebilir. Ancak yanma işleminin gerçekleşebilmesi için karışım içerisinde bulunan gazlar arasında hassas bir oran olması gerekmektedir. Havanın içerisinde metan olması durumunda:

- **LEL**'in (Alt Patlama Sınırının) %5'ine tekabül eden bir asgari sınır mevcuttur;
- **UEL**'in (Üst Patlama Sınırının) %15'ine tekabül eden bir azami sınır mevcuttur

Hava içerisinde bulunan **metanın “alev alma aralığı”** %5 ila %15 arasındadır. %5'in altında bulunan yoğunluklarda yetersiz yakıt mevcuttur; %15'in üzerinde olan yoğunluklarda ise yetersiz oksitlenme söz konusudur. (Yüksek oranda metan bulunan) depolama sahası gazı seyrelmesinin etkisinden dolayı her zaman bu aralığa girebilecek alanların olacağı kesindir; özellikle dar alanlarda depolama sahası gazının birikebileceği ortamlarda çok dikkatli olmak gerekir. Böyle bir durumda patlama riski ile beraber yangın riski de ortaya çıkmaktadır.

Karışımı doymuş hale getirebilecek inert gazların (CO₂ ve N₂ gibi) bulunması nedeniyle biyogazdaki havanın alev alma aralığı, saf metanın alev alma aralığına göre farklıdır; aslında, inert gazların, %20'nin üzerine çıkarak artması sonucu biyogaz yanmazlık aralığına girmektedir. Bu hususların daha iyi değerlendirilmesi amacıyla yanıcı gaz yönetimi kılavuzlarındaki yanıcılık şemalarına bakınız. (örneğin G. Zebetakis 1959 ABD Maden Bürosu).

4.2.2 Üretim ve riskler

Aşağıda da göreceğiniz gibi zamanla atıktan dolayı oluşacak depolama sahası gazının miktarının hesaplanması (ya da tahmin edilmesi); muhtelif tesis bileşenlerinin tasarlanması ve boyutlandırılması açısından önemli bir işlemdir. Bu işlem, aynı zamanda depolama sahası gazı toplama sistemi ile arıtma tesisinin bir sonraki yönetim ve izleme aşamaları açısından da hayati önem taşımaktadır.

Düzenli depolama sahası, hesaplama modellerine göre, başta anaerobik olmak üzere, tanımlanmış olan çeşitli biyokimyasal safhaların geliştirildiği bir **biyoreaktör** olarak görülmektedir. Her bir ton atığın zamanla oluşturduğu etkileri de bünyesine katarak üst üste örtüşmesi ile varsayılan bir üretim eğrisi elde edilir. Gözlemsel ve kuramsal gibi farklı hesaplama modelleri bulunmaktadır; bunların esası, organik madde dönüşümünün biyokimyasal dinamikleridir. Her halükarda depolama sahası gazının, toplanmakta olan atığın türünden ve atıkların zamanla ortaya çıkan kimyasal-fiziksel koşullarından çok etkilendiği aşîkârdır. Bir ton mutfak atığı; bir ton tekstil ürünü, cam ve metale göre nitelik ve nicelik anlamında farklı bir oluşuma yol açmaktadır. Organik maddenin en az %50'sinin, anaerobik koşullar altında depolama sahası gazına dönüşebileceği göz önünde bulundurulduğunda bir ton organik malzemenin, zamanla 200 m³'ün üzerinde dahi depolama sahası gazı oluşturabileceği tahmin edilmektedir.

Buna göre, örneğin, (içerisinde yüksek miktarda organik bileşen bulunan) 30.000 tonluk kentsel atığın sevk edildiği orta ölçekli bir düzenli depolama sahasında, zaman içerisinde en az 50 milyon m³'lük depolama sahası gazı yönetilebilecektir.

Her ne hesaplama modeli kullanılırsa kullanılsın, zaman içerisinde oluşabilecek depolama sahası gazı ile ilgili tutarlı bir tahminde bulunabilmemiz için aşağıda belirtilen verilerin bilinmesi önem arz etmektedir:

- Toplanan atıkların miktarı, bileşimi ve aşamalı evrimi (özellikle son 10 yıllık süreçte);
- Biyokimyasal tepkimeleri önleyen maddelerin yer alabileceği özel (sınai) atıkların olası varlığı;
- Atıkların ön arıtma işleminden geçmesi (biyostabilizasyon gibi);
- Tesiste zamanla gerçekleşen (ya da gerçekleşmeyen) yönetim şekilleri (atık sıkıştırma, atık üzerini kapatma, depolama sahası gazının toplanması ile ilgili uygulanabilecek yöntemler, sızıntı suyu yönetimi vs.);

- Atıktaki nem koşullarının değerlendirilebilmesi için depo ile harici su girdilerinin (yeraltı suyu, termo-yağış vs. gibi) yapılandırılması.

Depolama sahası gazının nitel ve nicel tanımında da açıklandığı üzere biyogaz denetimi ile yönetiminde zamanla ortaya çıkan eksiklik, kapsamlı bir şekilde kayda alınması gereken bir takım risk ve olumsuz etkileri de beraberinde getirmektedir. Bu riskler arasında **yangın ve patlama riskleri** yer almaktadır; biyogaz içerisinde önemli oranda bulunan metan gibi bir yanıcı gaz, bu gazın tutuşma mesafesi ve hareket edebilme kabiliyeti (gerek havada gerekse yerde); tesisten yüzlerce metre uzaklıkta dahi çok ciddi riskli durumlara yol açabilir. Aslında, özellikle, kötü yönetilen düzenli depolama sahalarında patlama sonucu ortaya çıkan yangın (içten yanma sonucu ya da dar alanlarda) ve toprak kaymaları seyrek olmayıp ciddi anlamda can ve mal kayıplarına yol açmaktadır.

Depolama sahası gazının çevre ve sağlık üzerinde yarattığı etkiler arasında şunları sayabiliriz: koku salınımlarının etkisi, hava kalitesinin etkisi, sera gazlarının salınımı ve fitotoksisite. Depolama sahalarının **çevre üzerinde** yol açtığı en yaygın **etki**; bazen depolama sahası gazının içerisinde yalnızca eser miktarda bulunan (merkaptan, H₂S, amin, PAHlar gibi) belli başlı maddelerin oluşturduğu kötü kokulu gaz şeklindedir; ancak makro bileşenler (metan, CO₂, hava, su buharı gibi) kokusuzdur. Depolama sahası gazı; koku kaynağı olmasının yanı sıra, yalnızca çökelmiş atıktan çıkan diğer maddeleri de toplamak suretiyle, depolanmış atıklarda oluşan fermentasyonun neden olduğu gazın, zemin tabakalarına (yüzey katmanlarına) doğru yükselmesini sağlayan bir aktarım vasıtasıdır.

Metan, daha önceden bahsedildiği üzere, küresel ısınma potansiyeli, karbondioksitinkinden 28 kat fazla olan güçlü bir "sera gazı"dır; geri kazanımı ve ıslahı mümkün olmayan bu gaz, küresel ısınmaya ciddi anlamda bir katkıda bulunmaktadır. Düzenli atık depolama sahaları, petrol sanayi ve hayvancılık sektörlerinden sonra kontrolsüz metan salınımlarına (antropojenik-insan kökenli) en çok katkıda bulunan (en az %15) ikinci/üçüncü unsurdur.

Atıklar ile atıkların yol açtığı kontrolsüz salınımlarda atmosfer üstü basıncın oluşmasını önleyen ve depolama sahası gazlarını etkili bir şekilde toplayarak ıslah eden bir sistem; insan sağlığı ve çevre üzerinde olabilecek riskler ile olumsuz etkilerin azaltılması açısından önemlidir.

4.2.3 Toplama ve taşıma

Düzenli depolama sahalarında gaz toplama faaliyeti; atık ile doğrudan temas edecek şekilde yerleştirildiğinde yalnızca fermentasyon yoluyla oluşan gazı ayırt edebilecek ürünlerin geliştirilmesi ve yönetilmesi süreçlerinden ibarettir.

Bu ögeler, kuşkusuz gaz emme ve işleme sistemine bağlanır. Gaz, bu ögeler olmaksızın, atık içerisinde bulunan atmosfer üstü basınçtan dolayı, kontrolsüz bir şekilde atmosfere salınarak tankın duvarlarından (yeterince suya dayanıklı olmaması durumunda) düzenli depolama sahasının yüzeyine ya da etrafında bulunan toprağa geçer.

Toplama sistemi, depolama sahasının yaşam döngüsünün başladığı andan itibaren tasarlanmalıdır; zira depolama sahası gazı, tam kapasiteli olanlara nazaran daha farklı özellikler taşısa dahi çok hızlı bir şekilde oluşmaya başlamaktadır. Toplama ögeleri ne kadar etkin olursa atık ile temas halinde olan yüzey artar. Genelde bunlar düşey kuyulardan ya da yatay drenaj hendeklerinden oluşmaktadır.

Vahşi depolama sahasının rehabilitasyonu halinde sonradan yeni düzenli depolama sahalarına uygulanan aynı kriterlerin izlendiği bir depolama sahası gaz toplama sistemi oluşturulur.

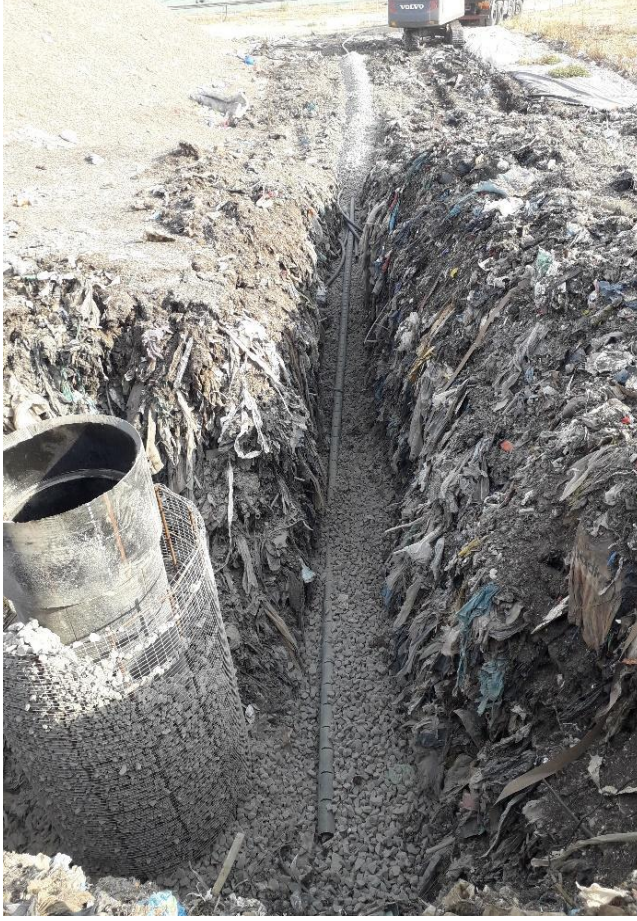
Düşey kuyu, dairesel bir kolon ile merkezi bir probdan (oluklu borudan) oluşan gaz toplama sisteminin tipik bir ögesidir (Şekil 4.3). Çakıl kolon, gazın drenaj yüzeyini korur; oluklu prob ise depolama sahası gazının emme ve taşıma ağına yüzey bağlantısı oluşturulmasını sağlar.

Kuyu, atığı toplayacak tankın tabanından itibaren düzenlenebilir (bkz. Şekil 4.3); çakıl kolon, böyle bir durumda, genellikle bir metal iskeletten (sıklıkla beton temel kazıklarından oluşan spiral çelik takviyeler kullanılmaktadır) ve bir metal muhafaza hasırından oluşan bir kafes ile korunmaktadır. Düzenli depolama sahasını geliştirme süreci ilerledikçe çakıl kolon ile merkezi prob, kademeli bir şekilde çalışma seviyesine yükseltilir; kolonda düşey deformasyonlar olsa dahi boşaltma kolonunun sürekliliğinin sürdürülmesi önem arz etmektedir.

Atık gövdesinin muhteviyatında artık çakıl kolon bulunmaktadır; bu yüzden zaman içerisinde metal parçalar bozulur, ancak zarara yol açmaz.

Tercihen silis ya da bazalt içeren maddelerden (40/70 boyutunda) çakıl oluşturulur (genelde demiryollarında bazalt içeren kırma taş kullanılmaktadır); böylece gaz ile sızıntı suyu içerisinde bulunan asitlerden zarar görerek parçalara ayrılacak kalkerli kayaların kullanılması önlenmiş

olur. Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) delikli borular genelde merkezi prob için kullanılmaktadır (bkz. Şekil 4.3.)



Şekil 4.3. Yatay drenaj ve kuyular. Kaynak: ASET Spa, Nisan 2019.

Kuyuların çapı, genelde 60/120 cm'dir; öte yandan, polietilen probun dış çapı 20/60 cm'dir (probun geniş olması, pompa gövdesinin sızıntı suyunu pompalamasını olanaklı kılmaktadır). Yarı dairesel kesite sahip yatık kuyular oluşturmak için tankların kenarında benzer teknikler kullanılabilir (Şekil 4.3).

Bir kentsel atık depolama sahasında ve ayrıca vahşi depolama sahalarında kuyunun “**etki yarıçapı**”nın 25 metre olduğu varsayılır. Tasarım ya da yönetim aşamasında optimal bir toplama işleminin gerçekleştirilmesi için kuyu ağının etkilerinin üst üste örtüşmesini sağlayacak şekilde yaklaşık 15-20 metrede kalması önerilir.

Düzenli depolama sahasının alt kısmından yükselen kuyular; tankın alt kısmında bulunan drenajdan çıkarılan depolama sahası gazının yukarı yönlü toplanması ve sızıntı suyunun aşağı yönlü boşaltılması anlamında çift işleve sahip oldukları için özellikle yararlıdır.

Ancak bu mekanizmayı etkileyen birçok etmen söz konusudur, örneğin:

- Atık taşıma ve sıkıştırma vasıtalarının mekanik hareketi;
- Atık çökmesi (malzemelerin sürtme yoluyla aşağı çekilmesi)
- Diferansiyel baskılar (örneğin; kuyular içerisinde);
- Malzemelerin bozulması (asit hareketlerinden dolayı);
- Baskı ve fiziksel şartlar (atığın ıslığı, polietilenin buna bağlı olarak yumuşaması karşısında 70°C'ye kadar çıkabilir);
- Kanalların (pissu borularının) tıkanması vs.

Tüm bu işlemler, söz konusu bileşenlerin, kullanılamaz hala gelene kadar kademeli bir şekilde işlevselliğini yitirmesine yol açmaktadır. Bu yüzden düzenli bir depolama sahasının yaşam döngüsünde bakımı / onarımı mümkün olmayan söz konusu teknik öğelerin zaman zaman yenilenmesi gerekmektedir.



Şekil 4.4. Yeni bir kuyunun açılması ve yeni kuyu oluşturmak amacıyla toplanan verilerin yer aldığı tablo. Kaynak: ASET Spa, Temmuz 2021.

Yeni toplama ögelerinin katılması konusunda bir ihtiyaç olduğunda atık gövdesi üzerinde açılacak yeni kuyular ile ilgili bir yapı girişiminin planlanması gerekmektedir. Bir vahşi depolama sahasının rehabilitasyonunda da bu durum geçerlidir.

Bu operasyon, konusunda uzman firmalarca gerçekleştirilmelidir; zira işlem gerçekleştirildiği sırada bir takım riskler de ortaya çıkmaktadır: Açılan deliğe düşme ihtimali, tutuşma alanına girme riski ile beraber depolama sahası gazının solunması, drenaj kolonunun yanlış bir şekilde gerçekleştirilmesi vs. Ancak delme işleminden önceki değerlendirme aşaması sırasında atık gövdesinin kimyasal-fiziksel şartı konusunda çok fazla bilgi toplanabilmektedir. Bu aşamada nem, ısı, hidrolik düşü, atık mineralizasyon durumu vs. gibi faktörler gözlenmektedir. Laboratuvar da test edilmek üzere, muhtelif kuyular arasında verilerin karşılaştırılması yoluyla çok daha yararlı bilgiler sağlayabilecek, atıklardan temsili örnekler de alınabilmektedir: dinamik solunum endeksi, artık karbon içeriği, her türlü biyo-metanasyon testi vs. (Bkz. Şekil 4.4)

Toprak işleme sırasında ilaveten toplama ögesi görevi gören yatay kanalların oluşturulması her zaman faydalıdır (bkz. Şekil 4.3); çakılla doldurulan basit hendekleri kazarak oluşturulan bu kanallar muhtelif yüksekliktedir; gerektiğinde ise gaz akışının artırılmasını sağlamak amacıyla oluklu borular da yerleştirilebilir. Bir kuyu ile diğer kuyu arasında yer alan bu hendekleri birleştirmek suretiyle, oluşabilecek kesintileri bertaraf eden bir yeraltı toplama şebekesi de oluşturulabilir; tek önlem olarak, kuyulara doğru tahliye edilmesi amacıyla, hendeğin içerisine girebilecek olan sızıntı suyu ile kondensatın kuyulara doğru bırakılması için hendeklere yeterli bir eğim verilebilir.

Toplama sisteminin üst kısmı; temel yapı ögesinin, depolama sahası gaz taşınım şebekesine bağlanmasını sağlamaktadır. Gaz, bu bağlantı elemanı olmadığı takdirde atmosfere yayılarak toplama sisteminin uygulanması ile yönetilmesi için harcanan çabaların boşa çıkmasına yol açabilir. Kuyu düşüleri iki şekilde gerçekleştirilebilir:

- Kuyunun içerisine yerleştirilen prob, aynı çapta olup (dümdüz olacak şekilde en az 2/3 metre derinliğinde) prob şeklinde bir kör boruya bağlanabilir;
- sızıntı suyu emme (alış) ve çekme borularının bağlanabileceği bir tür oda (hazne) oluşturmak suretiyle tahliye kolonunun üst kısmını tamamen kapatan bir “çan” yapısının kullanıldığı bu yöntem tercih edilebilir.

Böyle bir durumda depolama sahasının yüzeyinden hava çekilmemesi için kuyu ile depolama sahasının örtüsü arasında tam bir sızdırmazlığın sağlanması önemlidir.

Bu öğelerin, genellikle işletme makinelerinin çalışma sahasında yer aldığı göz önünde bulundurularak, hasar oluşmaması için yeterli korumanın sağlanması da gerekmektedir.

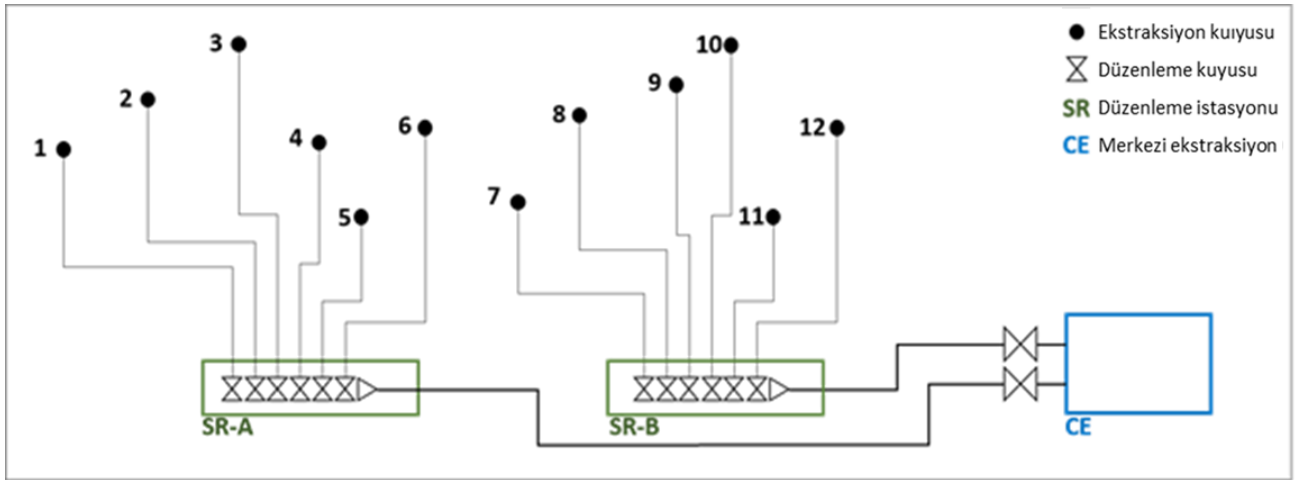
Tüm toplama öğelerini, ekstraksiyon ve arıtma tesisi ile birleştiren boru sistemi; **depolama sahası gaz taşınım sistemi**'ni oluşturmaktadır.

Aktarım sistemi; genellikle esneklik, hafiflik, kimyasal agresyona karşı direnç ve yönetim işlevselliği sağlayacak olup muhtelif çaplara sahip yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) borulardan oluşmaktadır.

Düzinelerce kuyu mevcut ise, tam bir düzenleme yapılabilmesi için münferit kuyu hatlarının toplanarak ara istasyonlarda birbirlerine yaklaştırılması gerekmektedir; aynı zamanda bu noktalara toplama işleminin düzenlenmesini ve kontrol edilmesini sağlayacak cihazlar da yerleştirilebilir; bunlar, **Kontrol İstasyonları** olarak da adlandırılmaktadır.

Aktarım sistemi şunlardan oluşmaktadır:

- **birincil hatlar** (genellikle 180/250 mm çapında olmak üzere) Kontrol İstasyonlarını Ekstraksiyon İstasyonuna bağlar;
- **ikincil hatlar** (genellikle çap olarak 90 mm'nin altına düşülmemesi önerilir) müstakil kuyular ile **Düzenleme İstasyonları**'nı birbirine bağlar.



Şekil 4.5. Bir depolama sahası gaz taşınım sisteminin tipik yapısı Kaynak: Magnano E., 2010, Düzenli depolama gazı, EPC.

Şekil 4.5’de, vurgulu iki tür hattın bulunduğu bir depolama sahası gaz taşınım sistemi yer almaktadır (birincil hatlar koyu renkle gösterilmiştir). Gaz iki nedenden dolayı boru içerisine girer: Atık gövdesinin içerisinde oluşan (doğal) basınç (fermentasyon sonucu) ve giriş

sisteminin (suni olarak) basıncının düşürülmesi; iki işlemin etkisi aynı anda ortaya çıkarak üst üste gelir; ancak hakim işlem, emme (giriş) işlemidir ve düzenlenebilme avantajına sahiptir.

Depolama sahası gaz taşınım sisteminde, basıncın düşürüldüğünün göz önünde bulundurulması gerekmektedir; parlayıcı bir gaz olması nedeniyle bu durum emniyet açısından avantajlı bir durumdur; kopma örneklerinde olduğu gibi çoğunlukla şebekeye hava girişi olmaktadır, kontrolsüz bir şekilde biyogaz salınımı söz konusu değildir.

Depolama sahası gazı, sıcak ve genellikle doymuş su buharı sıvısı şeklindedir, o yüzden depolama sahası gaz taşınım hatlarının yönetimi konusunda en temel sorunlardan biri; (özellikle soğuk dönemlerde) dış borularda ısıda oluşabilecek değişikliklerden (soğumadan) dolayı boruların içerisinde meydana gelen yoğuşmadır.

Yoğuşma, boru içerisindeki depolama sahası gazı akışını azaltır ya da engeller; bu yüzden bunların gelişiminin önüne geçilmesi mümkün olmadığı için pörç (boşaltma) işleminin gerçekleştirilmesi gerekir; hat üzerinde uygulanan basınç düşüşleri, genelde toplanan tüm sıvıların çıkarılmasına olanak tanımamaktadır.

Kondensat yer çekimi etkisi ile taşınır; hatlarda kuyulara ya da Düzenleme İstasyonlarına doğru eğimli profillerin bulunmasına dikkat edilir; bunun mümkün olmaması durumunda ise, basınç düşüşünün sürekliliğinin sağlanması için **özel kondensat kanalları**'nın temin edilmesi gerekir.

Genellikle düzenli depolama sahasının üzerinde bulunan borular; atık çökmesi, boruların ısı genleşmeye maruz kalması gibi nedenlerden dolayı sürekli meydana gelen yer değiştirmelerden etkilenmektedir; bu yüzden hatlar, yoğuşmanın tahliye edilebilmesi için gereken eğimi kaybedebilmektedir. Bunlar ayarlanabilir bağlantı yerleri bulunan bir iskele üzerine yerleştirildiğinde eğimler kontrol edilebilir ve boruların tek parça halinde olması sağlanabilir.



Şekil 4.6. Metal boruların taşıyıcıları üzerine yerleştirilmiş olan ikincil depolama sahası gazı hatları – ön planda kondensat deşarj cihazı, arka planda bir Düzenleme İstasyonu yer almaktadır. Kaynak: ASET Spa, Kasım 2020.

Yukarıda yer alan paragraflarda da bahsedildiği üzere bir kuyu içerisinde bulunan depolama sahası gazında sürekli nitel ve nicel değişiklikler meydana gelmektedir; bu değişikliklere ise şu etkenler yol açmaktadır: atık özellikleri, (yağış ve atmosfer basıncının etkilediği) kimyasal şartlar, sızdırmazlık, diğer kuyular ile etkileşim halinde olması vs.

Etkili bir toplama sürecinde (bir günde birkaç kez oluşan) bu değişikliklerin hesaba katılması ve emme oranı ile ilgili bir **düzenleme sistemi**'nin uygulamaya alınması gerekir; genelde bu işlem manuel olarak yapılmaktadır.

Düzenleme yöntemleri, aynı zamanda ulaşılmak istenen hedeflere göre değişkenlik göstermektedir: Enerji geri kazanımının en üst seviyede olması ya da yüksek miktarda depolama sahası gazı toplanılması isteniyorsa; bu şekilde gerçekleşecek bir işlemin, karmaşık bir sonuç vereceği aşikârdır; bu işlemin, mümkün ise modern **otomatik düzenleme sistemleri**'nde yapılması tercih edilir (bkz. Vaka Çalışması 8-İtalya)

4.2.4 Depolama sahası geri kazanımı/ıslahı

Toplanan biyogaz, önceki paragraflarda belirtildiği üzere, atmosfere salınamaz; ancak çevre üzerindeki olumsuz etkileri mümkün mertebe azaltacak şekilde işlem görmelidir.

Genelde depolama sahası gazının geri kazanımı/ıslahı ile ilgili işlemler, **Merkezi Ekstraksiyon** olarak bilinen tek bir tesiste gerçekleştirilir.



Şekil 4.7. Depolama sahası gazına yönelik Ekstraksiyon Tesisi ve enerji kazanımı. Kaynak: ASET Spa, 2005.

Tam bir yakalama ve taşıma şebekesinde basıncın yeterli düzeyde düşürülmesini ve gazın arıtma organlarına doğru sıkıştırılmasını sağlayan çift işlevli bir emme ve sıkıştırma sistemi vasıtasıyla gaz taşınır.



Şekil 4.8. Turbo körük – Merkezkaç fanlar. Kaynak: ASWM Srl, 2020. Tüm hakları saklıdır.

Bu çalışma; makineler, *santrifüj fanlar* ya da gazı çıkaran ve emilen gazı arıtma sistemlerine taşıyan santrifüj üfleç ile gerçekleştirilir.

Bu ekipmanlar; sıvı dinamiklerine yönelik olarak (göreceli) düşük ventilasyon basınçlı, ancak yüksek kapasiteli olmalıdır; üretimde ulaşılabilecek maksimum miktarlar da göz önünde bulundurularak yeterli olacak boyutlarda olmalıdır.

Emme aşamasında en uzakta bulunan kolektöre en az 10-20 mbar'lık vakum yapılması, kompresyon sırasında ise yaklaşık 1 barlık itme kuvvetinin uygulanması gerekir. Akış hızları konusunda ise birkaç yüz ila birkaç bin Nm^3/saat depolama sahası gazı emebilen/sıkıştırabilen makinelerin düşünülmesi gerekir. Bu makineler, (yılıda 365 gün/24 saat) hiç durmaksızın çalışan tüm sistemin itici kuvvetidir. Bu nedenden dolayı proje ile ilgili gereksinimleri karşılamak için bunların doğru bir şekilde boyutlandırılması ve süre ile beraber depolama sahasının ömrü boyunca oluşabilecek varyasyonların hesaba katılması önemlidir.

Genellikle akış hızında değişkenliğin sağlanması ve içlerinden biri bakımda iken bile sistemin çalıştırılabilmesi için tesisin, eş zamanlı olarak çalışabilecek (belki de yüksek akış hızlı yerine

düşük akış hızlı) daha fazla makine ile teçhiz edilmesi tercih edilmektedir. Santrifüj fanların, çok fazla enerji tükettikleri ve 24 saat boyunca çalıştıkları hesaba katıldığı takdirde elektrik tüketiminde tasarruf sağlayan inverterlerin yer aldığı makineleri kullanmak mümkündür.

Piyasada tüm tasarım ihtiyaçlarını karşılayan (son yıllarda Atex korumasını da kapsayan) farklı özelliklerin yer aldığı çok sayıda makine mevcuttur.

Depolama sahası gazı arıtma işlemi, genellikle biyogazın kalitesi ile akış hızına bağlıdır.

Metan içeriğinin, %25-30'dan fazla olması durumunda yanma yoluyla ısı bir işlem gerçekleştirilebilir; ancak düşük seviyede metan içeriği, yanma için yeterli ısıtma/ısı değeri sağlamaz.

Yüksek seviyede bulunan metan, depolama sahası gazı içerisinde yer alan enerjinin geri kazanımını sağlayacak çok daha gelişmiş ve etkili arıtma olanakları sağlamaktadır; öte yandan düşük oranda metan ihtiva eden depolama sahası gazları için uygulanması mümkün tek işlem biyofiltrasyon işlemidir.

Aşağıda belirtilmiş olan depolama sahası gazı işlemleri, metan oranında artan sıraya göre uygulanmaktadır:

- (%0-25) biyofiltrasyon;
- (> %25) statik veya alev torku;
- (> %30) yüksek ısı torklar;
- (> %35) mikrotürbin;
- (> %35-40) yanmalı motorlar.

Aşağıda belirtildiği üzere:

- Çok sıkıştırılmamış ve/veya kapatılmamış atıkların atıldığı, bu yüzden anaerobik (havasız) sahanın özellikle atıktaki etkinleştirilmediği vahşi depolama sahalarında;
- Düzenli atık depolama sahalarının ilk yönetim aşamalarında;
- veya yıllarca kapalı kalan düzenli atık boşaltma sahalarında;

depolama sahası gazının “kalitesi” yanma işlemini gerçekleştiren bir etken değildir. Bu gibi durumlarda depolama sahası gazının içerisinde bulunan organik ve inorganik maddelerin oksitlenerek biyolojik olarak ayrışmasına yol açan **biyofiltreler**’in tesiste kullanılması yararlı olabilir.



Şekil 4.9. Konteynerde organik madde içeren biyofiltre örnekleri (detay). Kaynak: ASWM Srl, 2021.

Biyofiltreler, büyük gözeneklere sahip organik madde (genellikle ağaç kabukları) ile dolu tank şeklindeki konteynerlerdir (Şekil 4.9). Bunlar statik ya da mobil olabilir (modüler biyofiltreler).

Bu organik kütle içerisinde bir takım biyolojik tepkimelerde bulunarak birçok maddeyi ayrıştırabilme özelliğine sahip (bakteri, mantar vs. gibi) çok sayıda mikroorganizma etkin hale gelmektedir.

Depolama sahası gazı içerisinde bulunan (metan, hidrojen sülfür, amonyak, merkaptan, hidrokarbon, karbon monoksit vs. gibi) maddeler, biyofiltre vasıtasıyla önemli ölçüde yüzeye çekilir ve ardından mikroorganizmalar ile metabolize edilir.

Bu maddelerin kirliliği azaltmaya yönelik etkinliği, genellikle yüksek olup metan oksidasyonunda %80'in üzerinde olabilir.

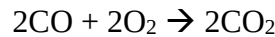
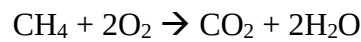
Bu teknoloji, kompost tesislerinin hasar verdiği sahalar ile evsel atık suların arıtımında yıllardır başarıyla kullanılmaktadır.

Yalnızca (ısı, nem, pH, gaz temas süresi vs. gibi) özel kimyasal ve fiziksel şartların ortaya çıkması durumunda oluşan tepkimeler, kolaylıkla kontrol altına alınabilmektedir. Metan/oksijen karışımının patlama aralığına (havada metan %5-15) girdiği an dikkatli olunmalıdır. Gaz karışımın akış hızı, yüksek modülerite ile ifade edilen tank boyutunu gösterecektir; ayrıca çok sınırlı olan giderler ile yönetim faaliyetleri şunları kapsamaktadır: Tesis malzemesinin kimyasal ve fiziksel şartlarının sürdürülmesi ve yenilenmesi (genellikle yıllarca sürmektedir) ve giren gaz ile emisyonların kontrol altına alınması.

Bu yüzden basit ve ekonomik bir sistem sayesinde düşük enerji içeriğine sahip depolama sahası gazından oluşan yüksek hacimlerin dahi etkili bir şekilde arıtılması mümkündür.

Depolama sahası gazı içerisinde %25'in üzerinde bir oranda metan bulunması durumunda en uygun arıtma işlemi **yakma (combustion)** işlemidir: Metan ve (H₂S gibi) diğer maddeler, oksidasyon işleminden geçerek düşük bir etkisi olan karbondioksit üretir (bkz. 1. paragraf).

(Enerji geri kazanımı olmaksızın meydana gelen) yanma işlemi; (inert azotun aynı kaldığı durumlarda) genellikle depolama sahası gazı içerisinde bulunan metanın yakıt, havada bulunan oksijenin ise oksitleyici görevi gördüğü bir **tork**'ta gerçekleşmektedir; temel tepkimeler şu şekildedir:



Depolama sahası gazında fluorlu, klorlu ya da kükürt bileşikleri var ise, beklenen şekilde hidroflorik asit (HF), hidroklorik asit (HCl) ve kükürt dioksit (SO₂) de oluşur.

Azot varlığı, özellikle yanma ısılarının yüksek (> 1.200 °C) olduğu durumlarda mutlak surette çok fazla azot oksidin oluşmasına da yol açar.

Düşük ısıda yanma, “alevli yanmada kısa kalış süresi” ve fakir gaz karışımı; dioksin ve furan gibi tehlikeli bileşiklerin oluşmasına yol açar.

Gözlemlenen yanma şartları, kimyasal tepkimeler üzerinde önemli bir etkiye sahip olup egzoz dumanlarının niteliğini belirlemektedir.

Etkili bir yanma işleminin gerçekleşebilmesi için aşağıda belirtilen unsur ve işlemlerin yerine getirilmesi gerekir:

- Yanma ısısının 850 ilâ 1.100°C arasında olması;
- Gaz bekletme süresinin 0,3 saniyeden fazla olması;
- Yeterli gaz karışımının olması;
- Alevin hızlı bir şekilde soğutulmaması.

En basit cihazlar, **statik ya da açık alev torklarıdır.**

Bunlar, genellikle doğrudan atıkta bulunan organik maddenin fermente edilmesi sonucu oluşan gazdaki aşırı basınçtan beslenir; sıklıkla doğrudan atık içerisindeki toplama öğelerinde bulunan bir ya da birden fazla torktan oluşmaktadır.

Bu ise depolama sahası gazının geri kazanımı ile ilgili ekonomik bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır; ancak burada iki temel olumsuz husustan bahsetmeliyiz; atıkların oluşturduğu yanma koşulları ve doğru bir yanma işlemi gerçekleşmediği için egzoz dumanlarının kontrol altına alınamaması.

Yüksek sıcaklık torkları, alev ısını içerde muhafaza ettiği için yüksek performans gösteren mekanizmalardır.

Yanma odası, refrakter (ateşe dayanıklı) kaplamalar ve diğer cihazların varlığı; birçok ülkede uygulanan gaz emisyon sınırlamalarına uygun yanma koşullarını sağlamaktadır.

Depolama sahası gazının, sadece torkta yanma işlemi vasıtasıyla geri kazanılabilmesi veya yalnızca enerji kullanan cihaz (aşağıda bakınız) bakımında iken kullanılabilmesi durumunda arıtılacak depolama sahası gazının azami üretim hızının da göz önünde bulundurulması gerekir.

Ancak önceki paragraflarda da belirtildiği üzere depolama sahası gazı üretimi; depolama sahası gazının yaşam döngüsü boyunca ciddi değişiklikler göstermektedir; bu yüzden, torkun daha

düşük akış hızı gerçekleştirmesini sağlayarak depolama sahası gazında asgari üretim seviyesini göz önünde bulundurmak önemlidir. Torkun boyutu, tork içerisinde yapılacak işe uygun olmalıdır.



Şekil 4.10. Yüksek sıcaklık torku. Kaynak: CONVECO Srl, 2021. Tüm hakları saklıdır.

Tek bir cihazın bu aralığı karşılayamaması durumunda sistem kapasitesine göre tek ya da çift olarak etkinleştirilen iki ögenin temin edilmesi yararlı olacaktır.

Depolama sahası gazında bulunan metanın yüzdelik oranının (en az %35) daha da artırılması halinde enerji geri kazanımı söz konusu olabilir; böyle bir durumda çevre açısından iki avantaj ortaya çıkar: aksi durumda aynı miktarda enerji üretimi için fosil yakıtı kullanılarak üretilebilecek metan emisyonlarının azalması ve atmosfere CO₂ salınmaması. Bu nedenden dolayı depolama sahasından biyogaz enerjisinin geri kazanımı, yenilenebilir bir kaynak olarak düşünülebilir.

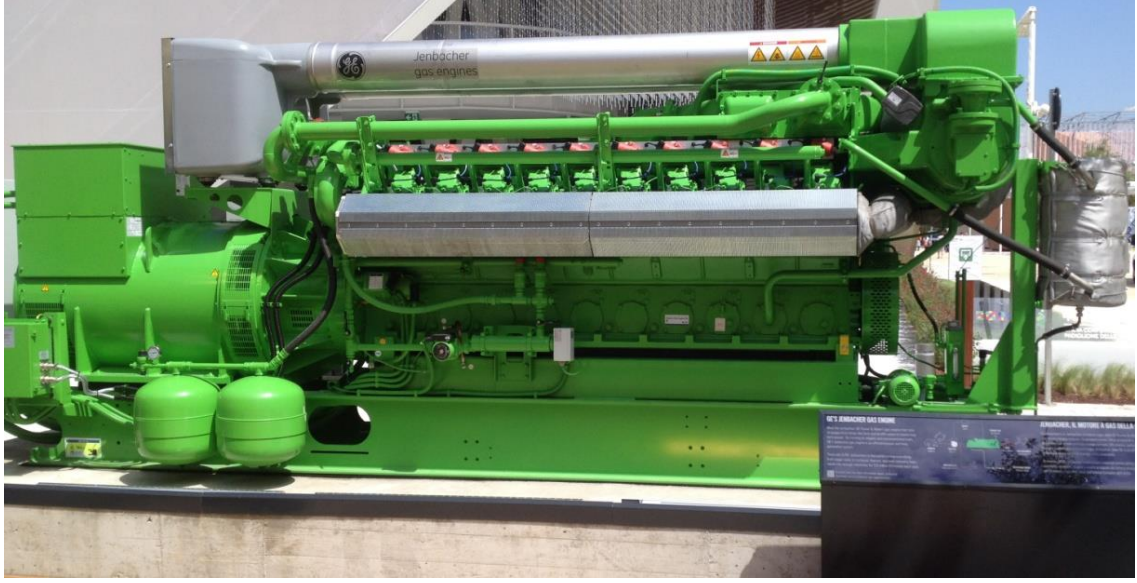
Depolama sahası gazında bulunabilecek kimyasal enerji, kolay bir şekilde **ısı** enerji'ye dönüştürülebilir (%90'a kadar verim sağlar); **elektrik** verimi ise, azami olarak %40'a kadar çıkabilir, ancak ekstra bir mekanik çalışma gerektirir (motor ve alternatör). Ancak (sera gibi) bir

tesisin yakınında ısı ısı enerjisi kullanıcısının olmaması durumunda kolayca aktarılabilen ve uzaktan erişimli kullanıcıların kullanabileceği elektriğin üretimi; sorunun tespiti açısından en uygun araçtır. Elektrikten ısı ısı enerjisinin geri kazanılması durumunda kojenerasyon prosesi (tek bir primer enerji kaynağından; genellikle mekanik enerji ile ısı ısı enerjisi gibi iki farklı yararlı enerjinin art arda üretilmesi) gerçekleştirilmiştir. İlk yatırım maliyeti yüksek olsa da, küçük ölçek ve modülerite gibi özellikleri taşıyan (çok daha fazla sayıda küçük makinenin kullanılmasına olanak tanıyan) **gaz mikrotürbinleri**, elektrik üretimine bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır.

Depolama sahası gazından elektrik üretilebilmesi için yararlanılan en yaygın yöntem, bir akım jeneratörüne bağlı bir **endotermik (ısıtılan) motor**'un kullanıldığı yöntemdir. Depolama sahası gazının, bir jeneratör seti ile elektrik gücüne dönüştüğü yöntem, diğer tüm yöntemlerden çok daha pratiktir.

Depolama sahası gazı, düşük metan yakıtı (>%35) kullanımını ve inert gazların (N₂ ve CO₂) varlığını destekleyen motorlarda yakıt olarak kullanılır. Hacim asgari 100 ila maksimum 1,500 kWe arasında değişir. Bu motorlar, arıtılacak depolama sahası gazı ile karışımında yer alan metan içeriğinin miktarına uygun ölçekte olmalıdır. Verimlilik, (%30-40 aralığında olmak üzere) yakıtta ve makinenin iş yüküne göre değişiklik gösterir.

Besleme basınçları, depolama sahası gazı emişinde kullanılan *turbo körüğü* tarafından üretilenlere uygundur; bu yüzden ekstra kompresöre ihtiyaç duyulmaz. Özel ulusal düzenlemelere bağlı olarak, sınırlamalara uygun olması gereken emisyonun kontrol altına alınabilmesi için motor karbürasyonunun değiştirilmesi ve uyarlanması mümkündür; ancak bunun mümkün olmaması durumunda karbon monoksit ile yanmamış hidrokarbonların oksitlenmesini sağlayan bir son yakıcının dâhil edilmesi gerekir.



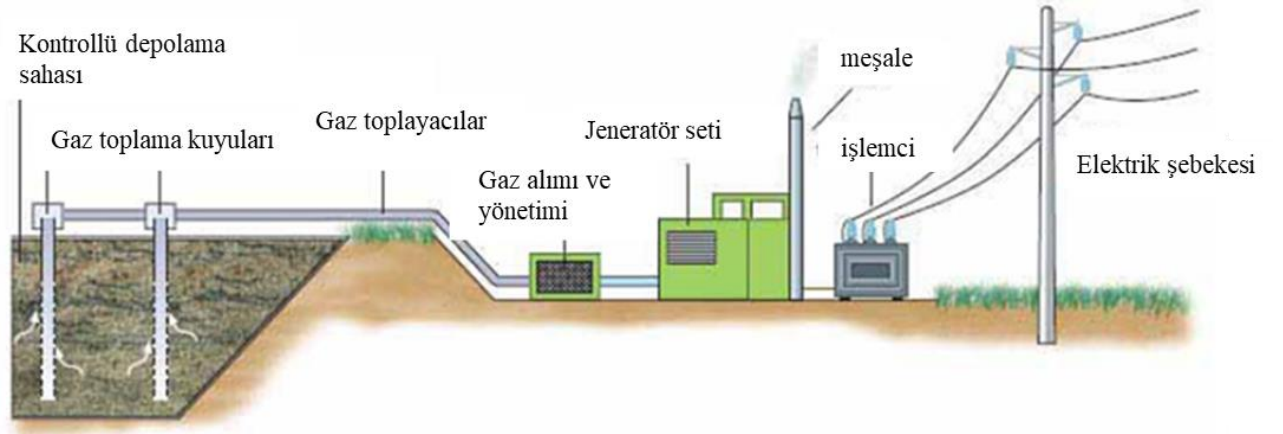
Şekil 4.11. GE'nin Jenbacher gaz motoru, ABD Pavyonu, Expo 2015, Milano, İtalya. Kaynak: sbamueller, CC BY-SA 2.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>>, via Wikimedia Commons.

Genelde depolama sahası gazının motora girmeden önce ön arıtmadan geçmesini öngörmek gerekir. Depolama sahası gazı, tesise, su buharı ile doymuş olarak ulaşır; bu yüzden, neminin giderilmesi gerekir; bu proses, aynı zamanda solüsyona giren (H_2S gibi) diğer maddelerin de çıkarılmasını sağlayabilir.

Hidroklorik asit, hidroflorik asit gibi diğer asitlerin veya siloksanların (organosilikon bileşiklerinin) varlığının güçlü olması durumunda diğer ön arıtma yöntemlerinin sağlanması gerekir.

Ancak genelde, başlangıç yatırımı kapsamında, endotermik motorların (ve bunlara bağlı aksesuarların) kullanılması; (10 yıldan ya da 100.000 saatten fazla) bir uzun çalışma süresi sağlamakta ve bakım giderleri kademeli bir şekilde artmaktadır; ancak elektrik satışından elde edilen gelirler ile de dengelenmektedir. Aslında, bahsedildiği üzere, bu üretim, yenilenebilir bir kaynak olarak görülmekte ve genellikle şebekeye satış tarifesi (tarife garantisi) kapsamında satılmaktadır.

Şekil 4.12'de depolama sahası gazından toplama, taşıma, arıtma ve elektrik üretim sistemi yer almaktadır.



Şekil 4.12. Depolama sahası gazı Toplama Sistemi yapısı ve depolama sahası gazı Enerji kullanımı: Kaynak: Uyarlama: Il Gestore Servizi Energetici (Gse) incontra la Regione Emilia-Romagna, regione.emilia-romagna.it, 2011.

4.3 Düzenli Depolama Sahalarında Sızıntı Suyu Yönetimi

4.3.1 Sızıntı Suyunun Özellikleri

Düzenli depolama sahalarında sızıntı suyunun kalitatif ve kantitatif özellikleri, birden fazla faktöre göre değişiklik arz eder; bunların içerisinde yer alan hava koşulları, hidrolojik özellikler, atık bileşimi ve yaş gibi bir takım faktörlerin kontrol altında tutulabilmesi zordur. Tüm bu öğeler, gerek Avrupa genelinde gerekse ulusal düzeyde farklı sistemsel yaklaşımlara neden olan kritik yönetim sorunlarına işaret etmektedir.

Kantitatif açıdan bakıldığında, (gerek yüzey üstünde gerekse yeraltında yağmur suyu infiltrasyonu gibi) harici girdiler ve atığın nem içeriği ve atık bertarafının biyokimyasal tepkimeleri ile ilgili su dengeleri gibi dâhili girdiler; sızıntı suyunun oluşmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Özellikle harici girdiler aşağıdakilerle ilgilidir:

- Tesiste; özellikle de yağış, sıcaklık, güneş ya da rüzgâra maruziyet, gerek yüzey üstünde gerekse yeraltında su kütlesi infiltrasyonu ile ilgili meteorolojik ve hidrojeolojik özellikler.
- Düzenli depolama sahası yönetim modeli: drenaj varlığı, primer ya da sekonder sızdırmazlık sistemi, atık tankları ile ilgili günlük genişletme (tevsii) ve kapatma işlemi, sızıntı suyunun resirkülasyonunun sağlanabilmesi.

- Atık özellikleri: *atık bileşimi, nem içeriğinin seviyesi, olası ön arıtma işlemleri, boyut, sıklık seviyesi.*

Sızıntı suyunun bileşimi ile sertliği, belli bir düzenli depolama sahasından diğerine göre önemli farklılıklar göstermektedir.

Depolama sahasının üzerinin kapatıldığı üst örtü sistemi gibi harici girdilerin bulunmaması durumunda bile düzenli depolama sahasının yaşam döngüsü sona erdikten sonra dahi atığın anaerobik ayrışması ve sızıntı suyu oluşumu devam eder. Bu da, düzenli depolama sahası yöneticilerinin, ulusal yasalara uygun bir şekilde çevre kirliliğine yol açmadan drenaj ve arıtma tesislerinin işletilmesini sağlamaları gerektiği anlamına gelmektedir.

Kalitatif açıdan bakıldığında ise özellikle atığın biyolojik bozunma prosesini etkileyerek farklı kirletici maddelerin sızmasına yol açan farklı etkenlerden etkilenen tipik bir depolama sahası sızıntı suyu bileşiminden bahsetmek mümkün değildir.

Biyolojik bozunma gelişimini etkileyen temel etkenler şunlardır:

- *Depolanmış atıkların nem içeriği seviyesi*
- *Organik bileşenlerin miktarı ve niteliği (özellikle atık su arıtma çamuru, spesifikasyon dışı kompost ise)*
- *Pil, ilaç, çözücü madde vs gibi ürünlerdeki metal ve/veya toksik madde seviyesi.*
- *Düzenli depolama tesisinin etrafında bulunan ve atık depolama türünü değiştirebilecek münferit atık toplama seviyeleri.*

Düzenli depolama sahasında atıkların ön arıtma prosesinden geçirilerek yerleştirilmesi, kirletici maddelerin sızıntı suyuna geçmesine yol açan atık kütlelerinin su emme kapasitesini etkileyen diğer iki önemli etmendir.

Bir araya getirilen birçok çalışma; sızıntı suyu içerisinde bulunan kirletici maddenin konsantrasyonunun, düzenli depolama sahasının ilk işletme yılında daha yüksek olduğunu, ancak yıllar içerisinde kademeli bir şekilde azaldığını göstermektedir. Bu eğilim; organik parametreleri (KOİ, BOİ, TOK) ve temel inorganik tuzları (ağır metal, sülfat vs.) etkilemektedir.

Bu organik parametreler şunlardır:

- *BOİ= biyokimyasal oksijen ihtiyacı*
- *KOİ=kimyasal oksijen ihtiyacı*
- *TOK= toplam organik karbon içeriği*

KOİ, BOİ ve amonyuma bağlı organik maddenin sızıntı suyundan çıkartılması işlemi, genel olarak, sızıntı sularının doğal sulara bırakılmasının ön bir şartıdır.

Mikrobiyolojik yönden bakıldığında biyolojik bozunma prosesi sırasında yaygın çevre koşulları (yüksek ısı ve pH) yüzünden mantar ile bakterilerin çoğalması kısıtlanır.

70-80'li yıllardan bu yana *matematiksel modellerin uygulanması*; sızıntı suyunun özelliklerinin ve düzenli depolama sahasının su dengesine bağlı çıkarımlarının öngörülmesine olanak tanımaktadır. Aslında atık kütlesi, bir "**biyoreaktör**" olarak görülen düzenli depolama sahasında doymamış bir öge vazifesi görür. Bu modeller, verimliliklerini kanıtlamış olup yerel veri analizi ile beraber düzenli depolama sahasının tasarım sürecinin ilk aşamasında fayda sağlayabilir.

4.3.2 Sızıntı suyu boşaltma ve toplama

Önceden de açıkladığımız üzere sızıntı suyunun düzenli depolama sahasının dışına sızması ve yayılması; sızıntı suyu toplama ve giderme sistemi ile beraber koruyucu bir tabaka ile kontrol edilmektedir. Vahşi depolama sahasının rehabilitasyonu söz konusu ise yalnızca rehabilite edilecek tesislerin kenarında inşa edilen yeni atık muhafaza tanklarından yararlanılması durumunda sızıntı suyu için temel ve zemin/duvar bariyerlerinin kullanımına izin verilir.

Tasarımlanmış bariyer sistemi etkili bir şekilde atığı muhafaza eder; bu sistemin en yaygın bileşiminde şunlar yer almaktadır:

- Kil
- Kum-bentonit karışımları
- Kum-çimento karışımları
- Geosentetik membranlar

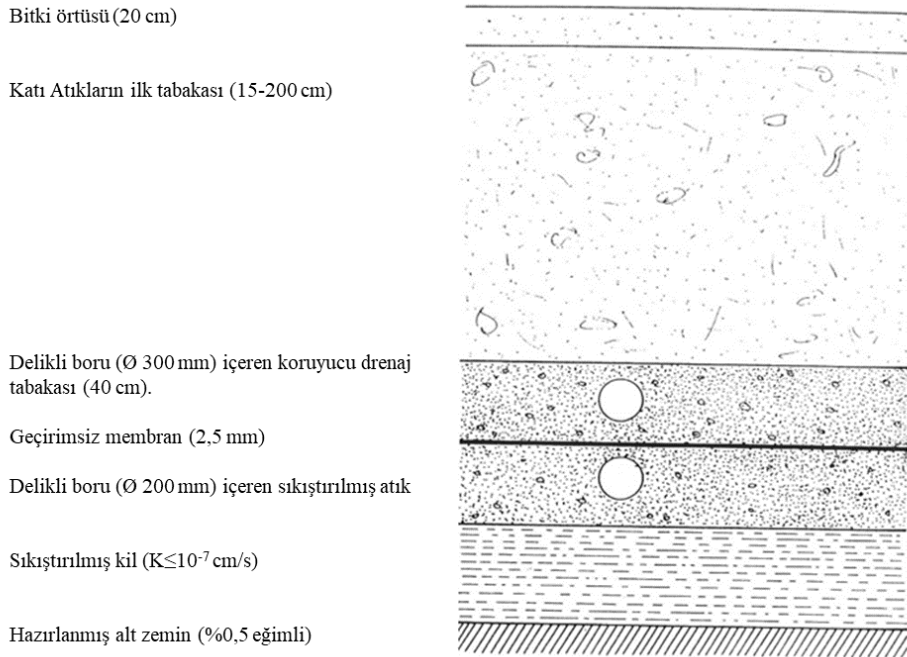
Geosentetik olarak adlandırılan sentetik polimerik malzemelerden oluşturulmuş bileşenler, yaklaşık son 20 yıldan bu yana geoteknik mühendisliği alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Tasarımlanmış muhafaza sistemlerinde kullanılan yaygın geosentetik maddeler arasında geomembran, geotekstil, geonet (yer ağı) ve geosentetik kil örtüleri yer almaktadır. Son zamanlarda elde edilen teknolojik gelişmeler, düzenli depolama sahası tasarımcıları açısından çok daha cazip geosentetik ürünleri de beraberinde getirmiştir; bu sayede (sızdırmazlık, drenaj, yamaç stabilitesi vs) gibi farklı işlevler aynı anda hayata geçirilebilmektedir.

Ayrıca söz konusu bu membranların; atık bertaraf tankının depolama kapasitesinin azaltılmaması yanında, ayrıca aynı teknik performansın elde edilmesi için gereken killi malzemenin uygun miktarda ve maliyet etkin olması anlamında bir takım avantajları mevcuttur.

Bunların belli başlı avantajları şunlardır:

- *Esnek olması*
- *Doğal malzemelerden oluşturulan bariyerlerin aksine dayanıklı olması*
- *Çekmeye ve kimyasal ve biyolojik taarruzlara karşı yüksek dirençli olması*
- *Ekonomik olması: Bunlar doğal emsallerine nazaran daha düşük maliyetlidir*

(Doğal ve sentetik olmak üzere) farklı türde ürünlerin birlikte kullanımı giderek yaygın hale gelmektedir; bunun başlıca amacı, seçilen malzemenin özelliklerinin en iyi şekilde kullanılmasıdır.



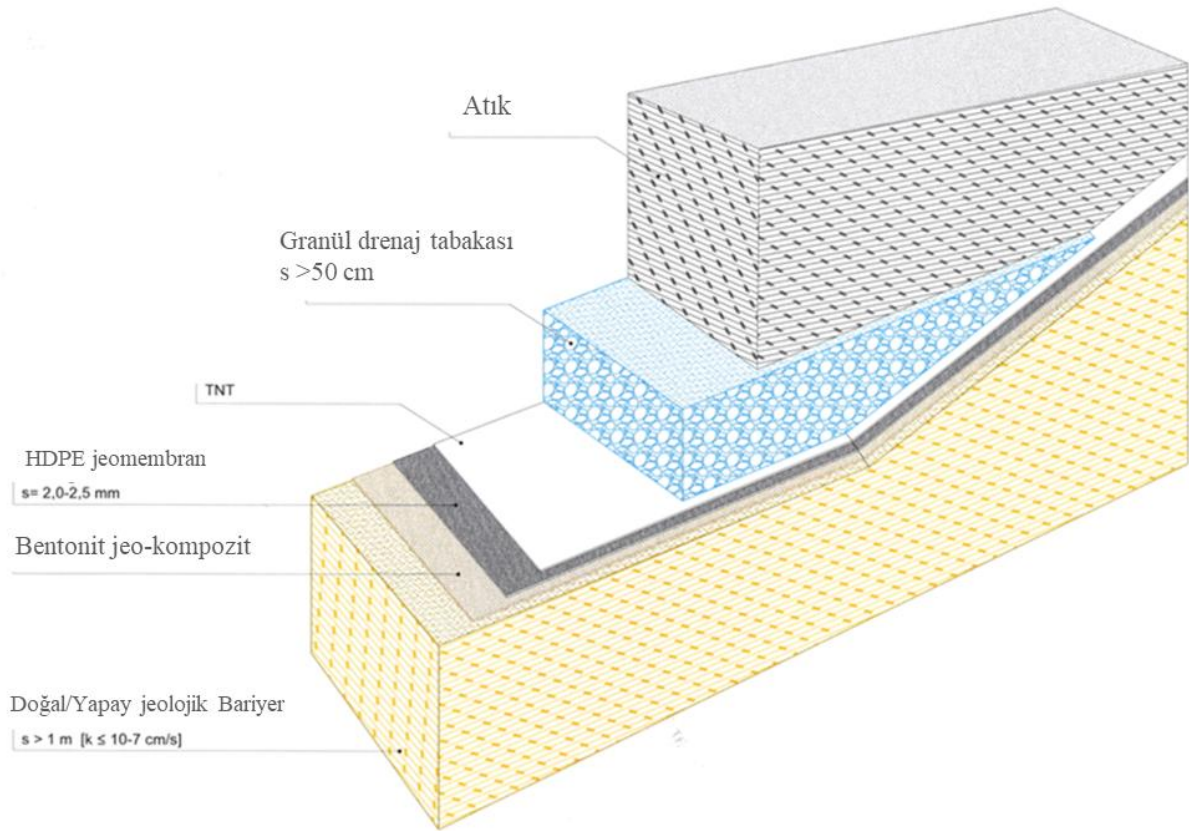
Şekil 4.13. Geleneksel bir MSWL dizayn kesiti. Kaynak: Gervasoni S., 2000, The controlled landfills [Kontrollü düzenli depolama sahaları], HOEPLI

Şekil 4.13'te bariyer oluşturulmadan önce doğal killi toprak ($K \leq 10^{-7}$ cm/s) veya adi temel zeminine sahip tesislerde kullanılan geleneksel MSWL (Municipal Solid Waste Landfill) [Kentsel Katı Atık Depolama Sahası] tasarım kesiti yer almaktadır.

Toprak altına yayılmalara neden olabilecek mineral bariyer ile doğrudan temas halinde hidrolik sızıntı suyu düşüsünün oluşmasına neden olarak doygun hale gelen suya dayanıklı

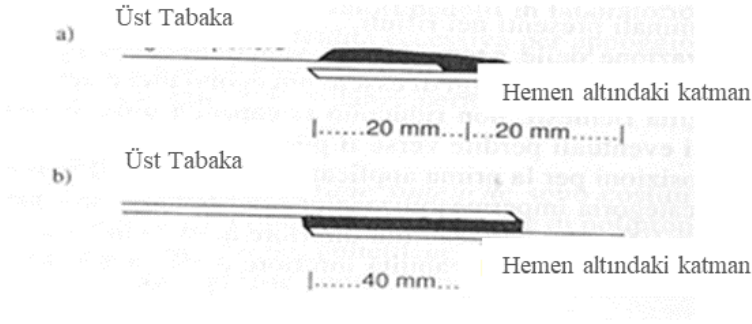
geomembranların altında drenaj tabakası oluşturma yöntemi zamanla terk edilmiştir. Ayrıca atık yerleştirme işleminin kesin tamamlama evresinde borular içerisinde sızıntı olup olmadığını tespit eden bu yöntem ile sızıntıyı tespit etmek mümkün değildir.

Bugün bentonit geosentetikler, geomembranlar arasında gitgide yaygın hale gelmektedir. Sodyum bentonitin kimyasal özellikleri, sızıntı suyu ile temas halinde hacminin on iki katı kadar artmasına yol açmaktadır. Bu şekilde sistemi sızıntılara karşı korumak mümkündür (Şekil 4.14) ve altta yer alan mineral bariyer ile de uyumludur.



Şekil 4.14. Geotekstil ile ilişkili farklı geomembran örnekleri. Kaynak: ASET Spa, 2022.

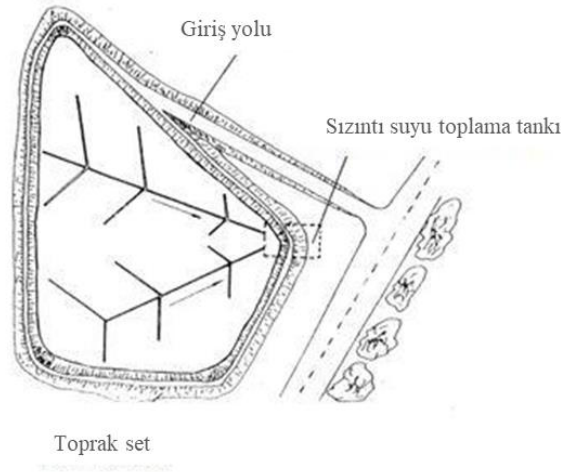
Sentetik örtü üretiminde en çok kullanılan malzeme, 2,0-2,5 mm kalınlığında HDPE geomembranıdır. HDPE geomembranları, yapışma (tutma) kapasitesini artıran ve toprak yığını içerisinde kaymasını zorlaştıran farklı kalınlıklara ve ayrıca yüzey pürüzlülüğüne sahip rulolar şeklinde temin edilmektedir.



Şekil 4.15. Tesiste sızdırmazlığı yapılmış HDPE geomembran çeşidi: a) (manuel olarak) üst üste bildirilmiş birleşme yerleri, b) otomatik olarak (araya yerleştirilmiş) birleşme yerleri.
Kaynak: Gervasoni S., 2000, Kontrollü depolama alanları

Genellikle (10x200 m gibi) geniş rulolar şeklinde temin edilen HDPE'ler, (asgari 200 mm olacak şekilde) uygun bir biçimde üst üste getirilerek ve yüzeyleri önceden zımparalanmış ya da ısıtılmış olması gereken kenar kısımları ısıtma işlemine tabi tutularak yan yana koymak suretiyle yerleştirilir. Bu rulolar kaynak dikişlerinin düzenli olmasına dikkat etmek suretiyle özel bir otomatik kaynak makinesi kullanılarak yerleştirilir (Şekil 4.15). Dikiş ve kenarlar, ruloların sökülebileceği kritik bölgelerdir ve suya dayanıklı bariyerde kesintiye yol açabilir. Tahribatlı ve tahribatsız testler vasıtasıyla geomembran örtü sistemlerinin bütünlüğü ile sağlamlığını ölçmek için iki yöntem uygulanmaktadır. İlk yöntem, tüm ekstrüksiyon (sıkma) kaynak işlemlerinde uygulanmaktadır; diğer yöntem ise, dikiş yeri örneklerini kesmek suretiyle gerçekleştirilmektedir.

Toplanan sızıntı suyu, altta bulunan suya dayanıklı bariyerin üzerine yerleştirilmiş olan drenaj tabakasındaki ince çatlaklı boru ağına bırakılır; tüm toplama şebekesinde, sızıntı suyunu, düşük jeodezik yükseltide bir yere yönlendirerek yer çekimi etkisi ile akmasını sağlayacak yamaçlar bulunmaktadır (Şekil 4.16). Daha sonra sızıntı suyu, suya dayanıklı toplama/dengeleme havzalarına pompalandıktan sonra nihayet arıtma sürecinden geçer.



Şekil 4.16. Kontrollü bir depolama sahasında sızıntı suyu drenajı ile ilgili tipik bir şema.
Kaynak: Kontrollü depolama alanları, Gervasoni S., 2000, HOEPLI

Daha önce de bahsedildiği üzere, suya dayanıklı toplama havzalarına atıkların aktarılmadığı vahşi depolama sahalarının rehabilitasyonu durumunda, toplanan sızıntı suyu, hâlihazırda kapalı olan kütle içerisinde açılan özel kuyulara iletebilir. Şekilde yer alan düşey biyogaz toplama kuyuları da, uyumlu hale getirilebilir (bkz. Şekil 4.3). Çakıl kolon, oluklu prob ile toplanıp yer çekimi etkisi ile kuyu dibine indirildiğinde boru hattı içerisinde özel eksenel pompalar ile emilebilen sızıntı suyunun drenajını sağlamaktadır.

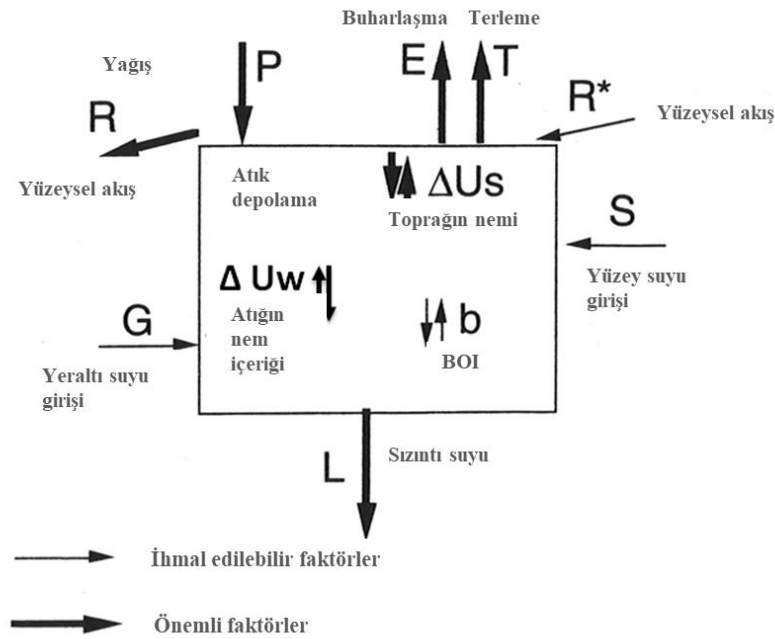
4.3.3 Sızıntı suyu oluşumunun en aza indirilmesi

Sızıntı suyu oluşumu, yağmur suyu, yüzey üstü ve/veya yer altı suyu infiltrasyonu gibi *harici girdiler*, atığın nem içeriği ve atık gövdesinde oluşan biyokimyasal tepkimelere bağlı su dengeleri gibi *dahili girdilere/tüketime* bağlı olarak değişebilir. Bu yüzden özellikle vahşi depolama sahalarının rehabilitasyonunda, zaman içerisinde sızıntı suyu oluşumunun en aza indirilmesi amacıyla yapılacak tüm müdahalelerin dikkatli bir şekilde planlanması çok önemlidir. Bunun devamında tam sızıntı suyu ekstraksiyonu, arıtma ve resirkülasyon prosesleri; biyolojik bozunma proseslerini kontrol altına almak ve tek bir üretim süresi içerisinde, depolama sahası için inorganik maddeler ile bozunmayan organik atıkların jeolojik olarak depolanmasını sağlayacak çözülebilir kirletici maddeleri taşımak suretiyle, sürdürülebilir düzenli depolamanın gerçekleşmesine ciddi anlamda katkıda bulunmaktadır.

Yukarıda belirtilen tüm hususlar ile ilgili olarak işlerin tanımlanması, tasarlanması ve boyutlandırılması amacıyla sızıntı suyu oluşumu ile ilgili öngörücü modellere gerek duyulmaktadır.

Düzenli depolama sahası, kapalı ve planimetrik olarak ifade edilen bir su havzası olarak düşünüldüğünde, sızıntı suyu miktarı, düzenli depolama sahası civarında bulunan harici ve dâhili su akışlarının kütle denkleğinden ve ayrıca birikimler ile iç üretimden/tüketimden etkilenmektedir.

Aşağıdaki şemada düzenli depolama sahasının su dengesine ilişkin ana bileşenlerin bir özeti yer almaktadır:



Şekil 4.17. MSW düzenli depolama sahasına ait su dengesinin basitleştirilmiş şeması. Kaynak: Collivignarelli C., 1996, *Kentsel Katı Atık Depolama Alanından Sızıntı Suyu Yönetimi*, C.I.P.A

Şemada şu formül yer almaktadır:

$$L_c = L - L_i$$

Bu formüle göre L_c (Toplanan sızıntı suyu miktarı), toplam miktardan (L) sınırdaki infiltrasyon (L_i) sonucu kaybolabilecek kısım düşülerek çıkan miktara eşittir (0'a eşit olması beklenir).

Denklemden tüm öğeler aynı bağıntıya sahip değildir. Baskın etken, yağış (P [Precipitation]) iken BOİ (b) etkeni önemsiz bir etkidir. Sonuçta ve özellikle vahşi depolama sahalarının

rehabilitasyonu halinde, sızıntı suyu oluşumunun en aza indirilmesi konusunda bu proste büyük bir etkisi bulunan faktörlere odaklanılmalıdır.

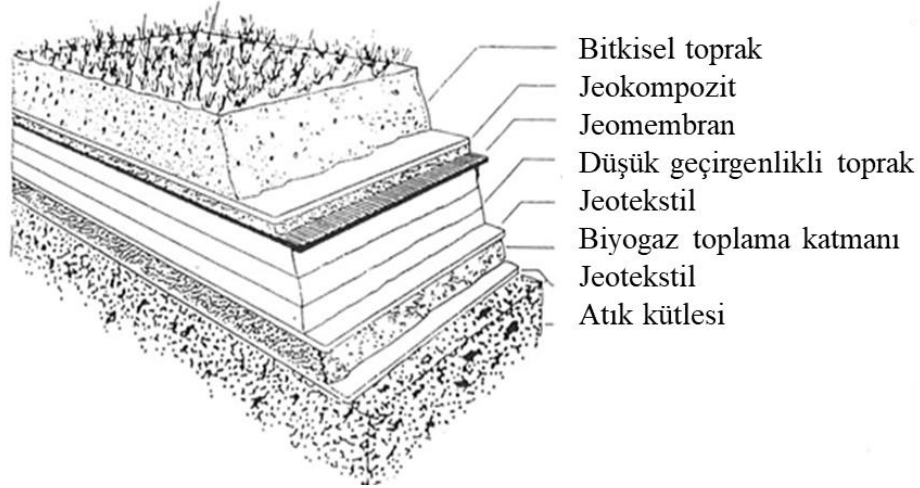
Boşaltma (drenaj) ve giderme faaliyetleri ile ortadan kaldırılabilir öğeler şunlardır:

- *Yüzeysel akış*
- *Yüzeysel su kütlelerinin infiltrasyonu*
- *Yeraltı suyu akiferleri (yeraltı su tabakaları) infiltrasyonu*

Diğer öğeler ise yalnızca etkili teknik operasyonlar sayesinde kontrol altına alınabilir:

- *Örtü malzemesi*
- *Örtü yüzeyinin eğimi*
- *Sıklık seviyesi*
- *Su yönetimi ile ilgili yöntemler*
- *Sızıntı suyunda olası resirkülasyon.*

Sızıntı suyunun oluşumunun en aza indirilmesine yönelik olarak kontrol altına alınabilir faktörler konusunda düzenli depolama sahasının üzerinin kapatılması (üst örtü kullanılması) amaçlı izlenen sistemin özellikle düşünülmesi gerekir. Üst örtü, kirlenmiş olan atık kütlesi ile yüzey arasında bir bariyer oluşturan bir muhafaza teknolojisidir; bunların hareketleri kısıtlanarak içeriklerinin oluşturacağı zararlı etkilere karşı insan ve çevrenin koruma altına alınması bu şekilde sağlanır. Tesisten sızabilecek kirlenici maddeleri en aza indirmek amacıyla kullanılacak örtünün, kirlenmiş olan yüzey altına doğru olabilecek yüzey suyu infiltrasyonunu kısıtlaması gerekir. Bu işlemin, sızıntı suyunun arıtılarak boşaltılması için gereken yüksek maliyetlerden dolayı gerek çevresel gerekse ekonomik bir değere sahiptir.



Şekil 4.18. Üst örtü sistemine bir örnek. Kaynak: Kentsel Katı Atık Depolama Alanından Sızıntı Suyu Yönetimi, Collivignarelli C., C.I.P.A.

Örtü sistemi, sızıntı suyunun oluşumunun en aza indirilmesini sağladığı gibi çevre kirliliğinin, aşağıda belirtilen birkaç şekilde yayılmasını önlemektedir:

- Rüzgârın, belirlenmiş maddeleri tesis dışına taşımasının önlenmesi
- “Uçucu” kimyasal maddeleri ihtiva eden ya da oluşturan atıklardan salınan gazların kontrol altına alınabilmesi
- İnsan ve yabani hayatın, tehlikeli madde ile temas etmelerinin önlenmesi ve kirletici maddelerin tesis dışına taşınması.
- Bitki yetiştirilmesi

Bu bağlamda su kütlesinin içerisinde bulunan yağmur suyu infiltrasyonunun sınırlı hale getirilmesinin amaçlandığı düşük geçirgenlik bariyerleri (LBP – low permeability barrier), alt sızdırmazlık sistemi kadar önemli olup düzenli depolama sahası tasarımcıları ile yöneticileri açısından tasarım konusunda özel bir ihtimam gösterilmesini hak etmektedir.

Bugün LPB ile ilgili en yaygın çözüm, HDPE ruloları ve sıkıştırılmış kil toprağı gibi doğal ve sentetik bariyerlerin bir arada kullanımıdır. Özellikle kapiler bariyerler, düzenli depolama sahaları ile ıslah tesislerinde son örtü olarak kullanılabilecek etkili bir sızdırmazlık sistemi çeşididir. Bu sistem, ince taneli kumun, iri taneli bir tabaka üzerine gelen kapiler tabakada kullanıldığı (kapiler blok) iki eğimli tabakadan oluşmaktadır. İnce taneli kum tabakasının, üstte bulunan sudan doymuş hale geldiği ve kapiler bloğa doğru akmasının önüne geçildiği olgusundan istifade edilmektedir. Su, bunun yerine, iki tabaka arasındaki ayırma yüzünün tam üzerinde

tutulur ve yamacın dibinde bir drenin (kanalın) yer aldığı bir hendeğe yanal pozisyonunda akar. Bu aşamada mühendislik anlamında bir yaklaşım gösterilmesi esastır; zira düzenli depolama sahasının yaşam döngüsünün sonuna gelindiği görülse de infiltrasyonun zamanla en aza indirilmesi anlamında örtünün etkinliğinin sağlanması açısından böyle bir yaklaşım çok önemlidir.

Sızıntı suyu oluşumunun en aza indirilmesine yönelik olarak **kontrol edilmesi mümkün diğer faktörler**, olağan düzenli depolama sahalarının yönetimi ile ilgili işlemler ile bağlantılıdır:

- *Atık tankı tevsiinin sınırlandırılması*; yağmur suyu infiltrasyonu riski en aza indirilebilir
- *Örtü için kullanılan malzemenin, tamamıyla geçirimsiz olmasından ziyade emici özellikli olması gerekir. Biyolojik bozunma, atıklarda belli bir seviyede nem bulunduran suyun varlığı sayesinde gerçekleşir. Örneğin, koku salınımlarında da faydalı olan spesifikasyon dışı ya da diğer yarı geçirgen rulolar.*
- *Sızıntı suyunun, uygun dağıtım sistemleri vasıtasıyla su kütlesi içerisinde resirkülasyonu; özellikle düzenli depolama sahasının özelliklerinin, çok üst seviyede su kaybına (buharlaşma ve terlemeye) yol açtığı durumlarda sızıntı suyu miktarlarının önemli oranda düşmesine neden olabilir (örneğin: belli başlı hava koşulları ve bitkisel toprak).*

4.3.4 Sızıntı suyunun arıtılması

Sızıntı suyunun nitelik ve nicelik farklılıklarından dolayı her tür düzenli depolama sahası için genel bir arıtma programı sunulması imkânsızdır. Aslında sızıntı suyu arıtma konusunda gerek aerobik gerekse anaerobik olmak üzere kimyasal, fiziksel ve biyolojik arıtma yaklaşımları söz konusudur. Düzenli depolama sahası yöneticileri, yürürlükte olan düzenlemelere bağlı olarak, tesiste kullanılan olanaklara göre yukarıda belirtilen türdeki arıtma sistemlerinin bir ya da birden fazlasını uygulamaya geçirmeyi seçebilir.

- Yerüstü suyu kütlelerinde bertaraf etme
- Belediyeye ait sızıntı suyu arıtma tesisleri

Çok yaygın olsa da çözüm sunmayan bir sistem ise, sızıntı suyu “sıvı atık” olarak görüldüğü için, sızıntı suyunun tanklar vasıtasıyla toplandığı, biriktirildiği ve arıtıldığı sistemdir. Bunun nedeni ise yetkili kurumların yasal anlamda farklı yorumlarda bulunmalarıdır.

Aynı şekilde su kütlesinde sızıntı suyunun resirkülasyonunu düzenleyen hukuki çerçeve de ülkesel bağlamı esas almaktadır. Örneğin, düzenli depolama sahası sızıntı suyunun, sızıntı suyunu oluşturan su kütlesinden farklı özel bir atık olarak görüldüğü durumlarda bunun

gerçekleştirilmesi mümkün değildir. Bu da sızıntı suyunun çıktığı düzenli depolama sahasında yeniden tahsisin yapılabilmesini olanaksız kılmaktadır.

Kaynakça

Arecco F., ed. 2012, *Biogas Energy*. Edizioni Ambiente Publisher (Energia da biogas)

ASWM Srl, <http://www.aswmsrl.com/>

Collivignarelli C., ed.1996, *Leachate management from Urban Solid Waste Landfill*, C.I.P.A. Publisher (*Il trattamento del percolato da discarica RSU*)

CONVECO Srl, <https://www.conveco.com/en/home.html>

Cossu, R., Grossule, V., Lavagnolo, M.C., 2020. *Sustainable Landfill: Role in the Circular Economy and Regulatory Proposals*. CISA publisher (*La Discarica Sostenibile*)

Damiani L., Gandolla M., 1992, *Biogas management in controlled landfills*, Istituto per l'Ambiente Publisher (*Gestione del biogas da discariche controllate*)

Gervasoni S., ed 2000, *The controlled landfills*, HOEPLI Publisher (*Le discariche controllare*)

Il Gestore Servizi Energetici (Gse) incontra la Regione Emilia-Romagna (2011,November,8th), regione.emilia-romagna.it. Retrieved 11:57, March 28th,2022 from https://energia.regione.emilia-romagna.it/leggi-atti-bandi-1/documenti-e-pubblicazioni/eventi/2010/il-gestore-servizi-energetici-gse-incontra-la-regione-emilia-romagna/CREMONA_GSE.pdf.

Magnano E., ed. 2010, *Landfill Biogas*, EPC Publisher (*Biogas da Discarica*)

Vismara R., Malpei F., Centemero M., ed. 2008, *Biogas from Urban Solid Waste*, Dario Flaccovio Publisher (*Biogas da rifiuti solidi urbani*)