

# کنترل و بازیافت گاز از محل های دفن مواد زائد جامد شهری

دکتر محمدعلی عبدلی

استاد دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران

## چکیده

تجزیه مواد زائد و تولید گاز یکی از مسائل اساسی محل های دفن می باشد. مواد زائد در محل های دفن تحت تأثیر میکروارگانیسم های موجود در خاک و مواد مغذی خود در شرایط بی هوازی به کنده تجزیه می شوند. در اثر تغذیه و رشد میکروارگانیسم ها محصولات نهایی حاصل از چندین بار تجزیه این مواد شامل گاز و هوموس می باشد. قسمت عمده گازهای تولیدی محل های دفن دی اکسیدکربن و متان می باشد که در صورت عدم کنترل می تواند مشکل آفرین شود. ایجاد گذرگاههای طبیعی و مصنوعی و کنترل حرکت گاز از طریق ایجاد لایه های گل رس و یا پوشش های مصنوعی روشهایی هستند که برای حل این مشکل انجام می شود. مدل سازی و پیش بینی نرخ تولید و انتشار گاز از محل های دفن جهت طراحی و بهره برداری این محل ها دارای اهمیت بسزایی می باشد. نرخ تولید گاز به ازای هر تن ماده زائد جامد شهری در محدوده گسترده ای بین ۱۲۰ تا ۳۰۰ مترمکعب می باشد. تجارب عملی بیانگر این است که گازهای تولیدی محل های دفن می تواند به صورت موفق با سایر منابع انرژی جایگزین شوند. بر طبق آخرین تحقیقات هر مترمکعب از گازهای تولیدی محل های دفن قادر به تولید ۵/۹ کیلووات ساعت انرژی است. این مقدار معادل  $\frac{2}{3}$  انرژی دریافتی از یک مترمکعب گاز طبیعی است. گازهای تولیدی محل های دفن می تواند جهت استفاده مستقیم در صنعت، تأمین انرژی توربین های گازی و موتورهای تولید برق مورد استفاده قرار گیرد. پتانسیل تولید متان در این محل در سال ۱۳۹۶ به  $10^8 \times 51 \times 3$  مترمکعب در سال خواهد رسید.

واژه های کلیدی: محل دفن بهداشتی، مواد زائد جامد شهری، نرخ تولید گاز، انرژی، انتقال گاز، مدل سازی، گازهای گلخانه ای

## ۱- مقدمه

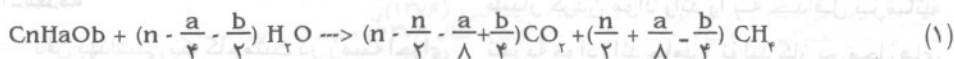
دفن بهداشتی یک گام مثبت در زمینه اجرای مدیریت مواد زائد جامد شهری است و می تواند خطرات بهداشتی و زیست محیطی ناشی از

تلنبار کردن مواد زائد را به حداقل برساند. تجزیه مواد زائد جامد و تولید گاز در محل های دفن یکی از مسائل اساسی این مکان ها می باشد. اساساً مواد زائد جامد از

هیدروکربورها، چربیها و پروتئین ها تشکیل یافته است، بنابراین عناصری مانند کربن، هیدروژن، اکسیژن، نیتروژن و سولفور در محل های دفن به وفور یافت می شود. مواد زائد تحت تأثیر میکروارگانیسم های موجود در خاک و در شرایط بی هوازی به کندی تجزیه می شوند. بعد از چندین بار تجزیه مواد زائد در اثر تغذیه و رشد میکروارگانیسم ها و آنزیمهای آنها محصولات نهایی تولیدی گاز و هوموس می باشد. عمده گازهای تولیدی محل های دفن، دی اکسیدکربن و متان هستند که در صورت عدم کنترل می توانند مشکل آفرین شوند. ایجاد گذرگاههای طبیعی و مصنوعی و کنترل حرکت گاز از طریق ایجاد لایه های گل رس و یا پوشش های مصنوعی، روش هایی هستند که برای حل این مشکل انجام می گیرند. کنترل و بهره برداری از گازهای تولیدی محل های دفن با ایجاد محل های دفن بزرگ در اوایل دهه ۱۹۷۰ در آمریکا شروع شد. در ۱۰ تا ۱۵ سال گذشته حدود ۳۰۰ ایستگاه بهره برداری از گاز در سراسر دنیا به بهره برداری رسیده است. در واقع سیستمهای کنترل و بازیافت گاز از محل های دفن یک تکنولوژی است که علاوه بر بازیافت انرژی می تواند مشکل زیست محیطی انتشار گاز را مرتفع کند.

## ۲- فرآیندهای تولید گاز در محل های دفن

شکل ۱ مهمترین واکنش های بی هوازی محل دفن بین گروههای میکروبی، مواد غذایی و محصولات میانی را نشان می دهد. اصولاً تجزیه بی هوازی مواد زائد را می توان به سه مرحله تقسیم کرد: ۱- هیدرولیز ۲- اسیدسازی ۳- متان سازی. در اولین مرحله، جامدات و ترکیبات آلی پیچیده محلول، توسط عوامل تخمیر کننده هیدرولیز شده و به اسیدهای چرب فرار اولیه، الکل ها، هیدروژن و دی اکسیدکربن تبدیل می شوند. در دومین مرحله، باکتری های اسیدساز (Acetogenic) محصولات مرحله اول را به اسید استیک تبدیل می کنند و در آخرین مرحله متان به وسیله باکتری های تولیدکننده متان (Methanogenic) تولید می شود. این گاز توسط دو دسته از باکتری ها تولید می شود: ۱- باکتری های اسیددوست (Acetophilic) با تبدیل اسیداستیک به متان و دی اکسیدکربن و ۲- باکتری های هیدروژن دوست (Hydrogenophilic) با تبدیل هیدروژن و دی اکسیدکربن به متان. فرآیند کلی تبدیل ترکیبات آلی به متان و دی اکسیدکربن را می توان به صورت معادله استوکیومتری ۱ نشان داد.



نمی باشد. فرآیند هیدرولیز یک فرآیند بسیار مهم در محل می باشد زیرا مواد زائد جامد آلی

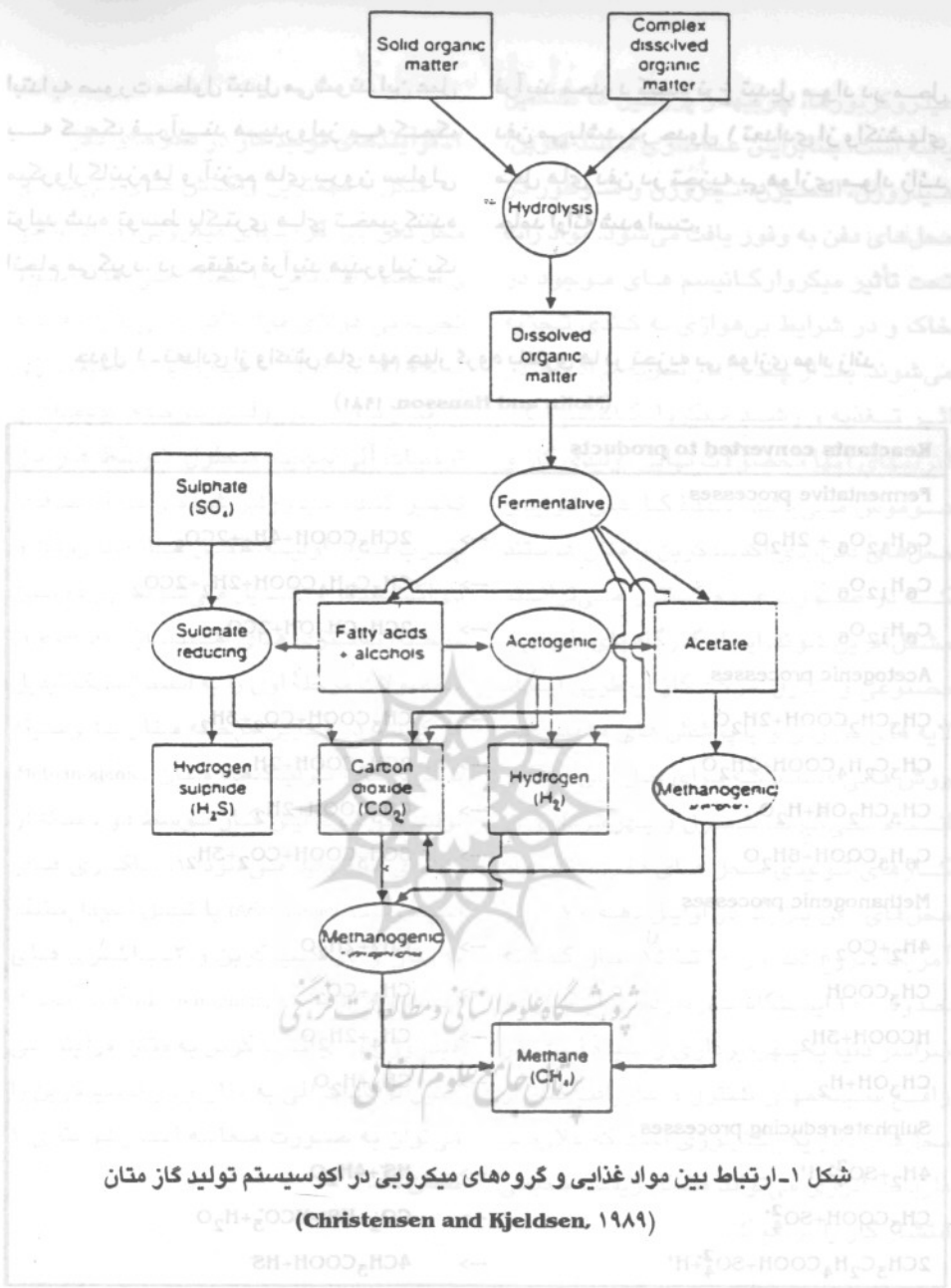
در شکل ۱ ملاحظه می شود که فرآیند واقعی به این سادگی و محدود به معادله ۱

ابتدا به صورت محلول تبدیل می‌شوند. این عمل به کمک فرآیند هیدرولیز به کمک میکروارگانیزم‌ها و آنزیم‌های برون سلولی تولید شده توسط باکتری‌های تخمیرکننده انجام می‌گیرد. در حقیقت فرآیند هیدرولیز یک

فرآیند محدود کننده نرخ تبدیل مواد در محل دفن می‌باشد. در جدول ۱ تعدادی از واکنش‌های محل‌های دفن در تجزیه بی‌هوازی مواد زائد جامد ارائه شده است.

جدول ۱ - تعدادی از واکنش‌های مهم چهار گروه باکتری‌ها در تجزیه بی‌هوازی مواد زائد (Molin and Hansson, ۱۹۸۱)

Reactants converted to products	
<b>Fermentative processes</b>	
$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O$	$\rightarrow 2CH_3COOH + 4H_2 + 2CO_2$
$C_6H_{12}O_6$	$\rightarrow CH_3C_2H_4COOH + 2H_2 + 2CO_2$
$C_6H_{12}O_6$	$\rightarrow 2CH_3CH_2OH + 2CO_2$
<b>Acetogenic processes</b>	
$CH_3CH_2COOH + 2H_2O$	$\rightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2$
$CH_3C_2H_4COOH + 2H_2O$	$\rightarrow 2CH_3COOH + 2H_2$
$CH_3CH_2OH + H_2O$	$\rightarrow CH_3COOH + 2H_2$
$C_6H_5COOH + 6H_2O$	$\rightarrow 3CH_3COOH + CO_2 + 3H_2$
<b>Methanogenic processes</b>	
$4H_2 + CO_2$	$\rightarrow CH_4 + 2H_2O$
$CH_3COOH$	$\rightarrow CH_4 + CO_2$
$HCOOH + 3H_2$	$\rightarrow CH_4 + 2H_2O$
$CH_3OH + H_2$	$\rightarrow CH_4 + H_2O$
<b>Sulphate-reducing processes</b>	
$4H_2 + SO_4^{2-} + H^+$	$\rightarrow HS^- + 4H_2O$
$CH_3COOH + SO_4^{2-}$	$\rightarrow CO_2 + HS^- + HCO_3^- + H_2O$
$2CH_3C_2H_4COOH + SO_4^{2-} + H^+$	$\rightarrow 4CH_3COOH + HS^-$



شکل ۱- ارتباط بین مواد غذایی و گروه های میکروبی در اکوسیستم تولید گاز متان (Christensen and Kjeldsen, ۱۹۸۹)

تجزیه کلی فرآیند تجزیه میکروبی بر روی ترکیب گازهای محل دفن برای یک سلول کاملاً ممکن در شکل ۲-۲ تشریح شده است. مطابق این شکل ترکیب گاز می تواند مطابق با پیشرفت اثرات کلی فرآیند تجزیه میکروبی بر روی ترکیب گازهای محل دفن برای یک سلول کاملاً ممکن در شکل ۲-۲ تشریح شده است. مطابق این شکل ترکیب گاز می تواند مطابق با پیشرفت

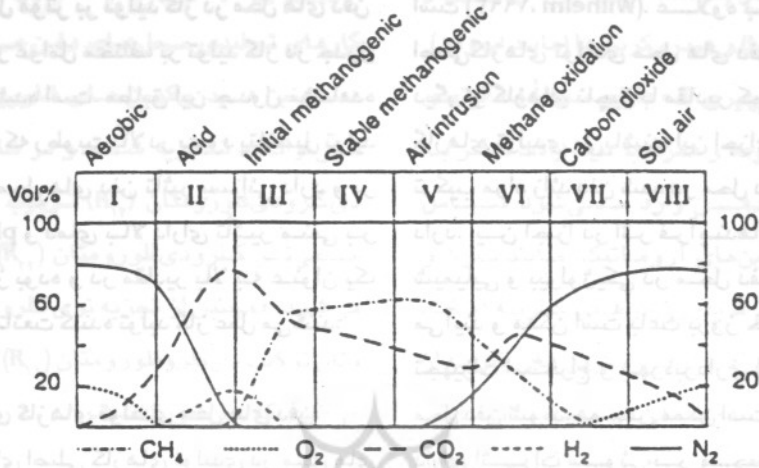
تجزیه مواد زائد به هشت فاز مجزا تقسیم گردد که این قسمتها ذیلاً ارائه می گردد.  
 فاز I: یک فاز کوتاه هوازی همراه با افت اکسیژن و نیتروژن با کمپوست شدن مواد آلی

تجزیه مواد زائد به هشت فاز مجزا تقسیم گردد که این قسمتها ذیلاً ارائه می گردد.  
 فاز I: یک فاز کوتاه هوازی همراه با افت اکسیژن و نیتروژن با کمپوست شدن مواد آلی

میزان  $N_2$  به سبب حضور این گازها.

**فاز III:** شروع دومین فاز بی‌هوازی، باکتری‌های متان ساز شروع به تولید  $CH_4$  می‌کنند و مقدار  $CO_2$  و  $H_2$  کاهش می‌یابد.

قابل تجزیه و تبدیل آن‌ها به  $CO_2$   
**فاز II:** تولید باکتری‌های اسیدساز تحت شرایط بی‌هوازی و تخمیر اسیدهای چرب فرار و تبدیل آنها به  $CO_2$  و  $H_2$ ، همچنین کاهش



شکل ۲- چگونگی فازبندی ترکیب گاز در یک سلول محل دفن

**فاز VIII:** تشکیل متان اکنون قابل چشم‌پوشی است و هوای داخل شده در حال اکسیدکردن مواد آلی کربنی و تولید  $CO_2$

**فاز IV:** پایدار شدن فاز متان سازی، شاخص آن تولید ۶۰-۵۰ درصد  $CH_4$  و غلظت کم  $H_2$  می‌باشد.

**فاز VIII:** نرخ فرایندها اکنون به نرخی که در خاکهای طبیعی یافت می‌شود، رسیده است و گاز محل دفن شروع به اجتماع و تشکیل هوا خاک می‌نماید.

**فاز V:** کاهش تولید متان به علت ورود هوا به قسمتهای خارجی محل دفن و در نهایت به دلیل پائین آمدن نرخ تولید دی‌اکسیدکربن یک افزایش نسبی در مقدار گاز  $CH_4$  به وجود می‌آید.

ترتیب فازبندی ترکیب گاز که در شکل ۲ آمده است، نشان دهنده طول مدت هر فاز نمی‌باشد زیرا این مسأله به فاکتورهای زیادی از جمله عوامل غیرزیستی (Abiotic) و شرایط محلی نظیر ترکیب مواد زائد و روش دفن بستگی دارد. اصولاً بعد از فاز هوازی اولیه

**فاز VI:** متان در مرکز سلول زائدهات به وجود آمده و هنگامی که به آرامی از قسمتهای بیرونی محل دفن در حال خارج شدن است، به  $CO_2$  اکسید می‌شود، مقدار  $N_2$  نیز اکنون به مقدار قابل توجهی رسیده است.

که برای چند روز یا حداکثر چند هفته طول می کشد، زمان انجام فازهای بعدی ممکن است ماهها، سالها و دهه ها به طول بیانجامد.

۳- عوامل مؤثر بر تولید گاز در محل های دفن  
تأثیر عوامل مختلف بر تولید گاز در جدول ۲ ارائه شده است. مطابق این جدول مشاهده می شود که رطوبت بالا در بهبود پتانسیل تولید گاز در محل های دفن تأثیر بسزائی دارد و بر عکس pH و دمای بالا دارای تأثیر منفی بر تولید گاز بوده و در مقادیر بالا به عنوان یک عامل ممانعت کننده تولید گاز عمل می کنند.

۴- اجزای گازهای تولیدی محل های دفن  
اجزای اصلی گازهای تولیدی در محل های دفن در مدت زمان کوتاهی پس از دفن (چند هفته یا چند ماه) عبارتست از متان با  $50 \pm 5$  درصد و دی اکسید کربن با  $5 \pm 45$  درصد. این

درصدها در طول عمر محل دفن تقریباً ثابت باقی می ماند. با افزایش عمر محل های دفن درصد گاز متان افزایش می یابد. معمولاً نسبت حجمی متان به دی اکسید کربن بین  $1/5 - 1/2$  است (Wilhelm, ۱۹۹۳). علاوه بر اجزای اصلی گازهای تولیدی محل های دفن یکسری دیگر از گازهای ناچیز با مقادیر کم نیز جزء گازهای تولیدی می باشند. این اجزای ناچیز به ترکیب مواد زائد دفن شده در محل دفن بستگی دارد. این اجزا در اثر فرآیندهای فیزیکی شیمیایی و بیولوژیکی در محل دفن بوجود می آیند و ممکن است باعث بروز خسارت در تجهیزات استخراج و بهره برداری از گازهای محل دفن شوند. همچنین ممکن است این گازها دارای اثرات سوئی بر محیط زیست و موجودات زنده باشند. اجزای ناچیز گازهای تولیدی در محل های دفن را به دو دسته می توان تقسیم کرد:

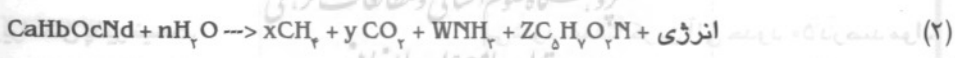
جدول ۲- تأثیر عوامل مختلف بر تولید گاز در محل های دفن

Variable	Gas enhancement potential			Gas inhibition potential		
	Low	Medium	High	Low	Medium	High
Composition		+				
Density	+					
Particle size	+					
Temperature		+				
pH		+				
Nutrients	+					
Microbes	+					
Moisture			+			
Oxygen						
Hydrogen	+					
Sulfate						
Toxics						
Metals						

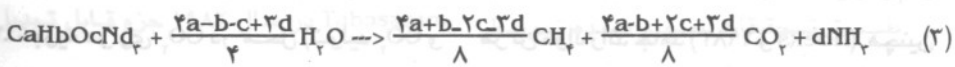
مخلوطی از دی‌کلرواتیلن تولید می‌شود که در نهایت از آن کلریدوینیل سرطان‌زا تولید می‌شود. علاوه بر بنزن و متیل مرکاپتان، کلریدوینیل مهمترین ماده منتشر شده از گازهای تولیدی محل‌های دفن می‌باشد. همچنین هیدروکربن‌های فلورینه نیز می‌توانند تجزیه شده و در نتیجه از دی‌کلرودی‌فلورومتان ( $R_{11}$ ) ترکیب بسیار سمی‌تر کلرودی‌فلورومتان ( $R_{12}$ ) تولید می‌شود. همچنین از تجزیه تری کلروفلور و متان ترکیب دی‌کلروفلورومتان ( $R_{11}$ ) حاصل می‌شود که سرطان‌زا است. (۹)

۵- تخمین میزان گازهای تولیدی از محل های دفن

واکنش کلی فرآیند تشکیل متان از مواد آلی به صورت معادله ۲ بیان می‌شود:



(توده سلولی زنده) تبدیل می‌شود می‌توان برای ارزیابی عملی تولید گاز از تبدیل سلولی مواد آلی چشم‌پوشی نمائیم در این صورت معادله ۲ به معادله ۳ تغییر می‌یابد.



۱- اجزای ناچیزی که در حین تجزیه بی‌هوازی در محل دفن تولید می‌شود، شامل ترکیبات اکسیژن‌دار (مانند اتانول و متانول)، ترکیبات گوگرددار (مانند سولفید هیدروژن و مرکاپتانها) و هیدروکربن‌ها (مانند لیمونن) ۲- اجزای ناچیزی که دارای منشأ فعالیت‌های انسانی بوده و همراه با مواد زائد دیگر به محل دفن وارد می‌شود شامل هیدروکربن‌های آروماتیک (مانند بنزن و تولوئن) و هیدروکربن‌های کلرینه (مانند فرئون‌ها). اهمیت هیدروکربن‌های کلرینه از نظر زیست‌محیطی در محصولات سمی ناشی از تجزیه بیوشیمیایی آنها می‌باشد.

در تجزیه بیوشیمیایی این مواد عمل جایگزینی هالوژن با هیدروژن انجام می‌شود. در این مکانیزم در اولین مرحله تتراکلرواتیلن به تری‌کلرواتیلن که سمی‌تر است، تبدیل می‌شود. در دومین مرحله

مقدار انرژی حاصل شده از این واکنش به چند قسمت انرژی آزاد متان، انرژی برای سنتز باکتری‌ها و آنتالپی واکنش تقسیم می‌گردد. از آنجا که درصد کمی از مواد آلی به بیومس

مطابق معادله ۳ به ازای هر یک مول کربن آلی یک مول گاز تولید می شود. از آنجا که یک مول گاز در صفر درجه سانتیگراد ۲۲/۴ لیتر حجم اشغال می کند، بنابراین یک مول کربن آلی ۲۲/۴ لیتر گاز تولید می نماید. اگر این موازنه را به صورت وزنی تبدیل نمائیم معادله ۴ حاصل می شود.

(۴) لیتر گاز (CH<sub>4</sub>+CO<sub>2</sub>) = ۱/۸۶۷ گرم کربن ماده آلی تخمین میزان گاز تولیدی از تجزیه مواد آلی می تواند از طریق COD (مصرف اکسیژن

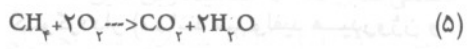
ولی طبق روش فوق نمی توانیم میزان دی اکسید کربن را تخمین بزینم و لازم است که نسبت متان به دی اکسید کربن را هم به صورت تجربی داشته باشیم. اصولاً تخمین میزان دقیق گاز CO<sub>2</sub> تولیدی در محل های دفن به دلایل زیر امکان پذیر نیست.

۱- انحلال CO<sub>2</sub> در شیرابه تولیدی در محل های دفن (متقابلاً CH<sub>4</sub> فقط به مقدار کمی در شیرابه تولیدی حل می شود).

۲- انحلال تعادلی CO<sub>2</sub> به صورت یونهای HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> و CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> و رسوب کردن آن به صورت کربنات

۳- تجزیه هوازی CO<sub>2</sub> در محل (تولید CO<sub>2</sub> و

برای اکسیداسیون کامل آن ماده آلی) نیز انجام شود. مطابق معادله ۵ یک مول متان برای اکسیداسیون کامل به ۲ مول اکسیژن نیاز دارد.



طبق این معادله به ازای هر ۲ مول اکسیژن مصرفی برای اکسیداسیون کامل مواد آلی، ۱ مول گاز متان حاصل می شود که براساس معادله وزنی آن خواهیم داشت:

(۶) لیتر گاز متان ۰/۲۵۱ = گرم گاز متان ۰/۲۵ = یک گرم اکسیژن مصرفی برای مواد آلی (COD)

عدم تولید CH<sub>4</sub> بنا بر دلایل فوق در محاسبات برای تخمین گاز CO<sub>2</sub> تولیدی در محل های دفن می بایستی آن را با توجه به نسبت  $\frac{CH_4}{CO_2}$  تعیین کنیم. معمولاً این نسبت ۰/۶-۰/۵۵ در نظر گرفته می شود. عمدتاً کربن آلی حدود ۵۰ درصد مواد آلی خشک را تشکیل می دهد و از این مقدار ۵۰ درصد آن قابل تجزیه بیولوژیکی است. برخی از ارقامی که برای تخمین کربن آلی مواد زائد جامد شهری توسط محققین ارائه شده است عبارتست از ۲۰۰ کیلوگرم در هر تن مواد زائد جامد (۱۹۸۲ و Tabasaran) و ۲۵۰ کیلوگرم در هر تن مواد زائد جامد (۱۹۸۳ و Hoeks). همچنین



فرمول زیر نیز جهت تعیین مقدار کربن آلی قابل تجزیه بیولوژیکی در سال ۱۹۸۸ توسط Andersott da and Cossu پیشنهاد شده است:

$$(OC_b)_i = (OC_i) (fb)_i (1 - u_i) P_i \quad (7)$$

که در آن:

$(OC_b)_i$ ، میزان کربن آلی قابل تجزیه بیولوژیکی امین جزء مواد زائد مرطوب (کربن قابل تجزیه Kg مواد زائد مرطوب Kg)

$(OC_i)$ ، مقدار کربن آلی در امین جزء مواد زائد خشک (کربن آلی Kg جزء ام خشک Kg)

$(f_b)_i$ ، جزء قابل تجزیه بیولوژیکی  $OC_i$

$$\frac{\text{کربن قابل تجزیه Kg}}{\text{کل کربن Kg}}$$

$u_i$ ، مقدار رطوبت جزء ام در مواد زائد

$$\left( \frac{\text{آب Kg}}{\text{جزء ام مواد زائد مرطوب Kg}} \right)$$

$P_i$ ، وزن مرطوب جزء ام در مواد زائد

$$\left( \frac{\text{وزن جزء ام Kg}}{\text{وزن کل مواد زائد Kg}} \right)$$

در جدول ۳ این مقادیر برای اجزاء مختلف مواد زائد محل‌های دفن آورده شده است.

جدول ۳- مقدار رطوبت ( $u_i$ )، مقدار کربن آلی ( $OC_i$ ) و جزء آلی قابل تجزیه بیولوژیکی ( $(f_b)_i$ )

برای اجزاء مختلف مواد زائد (۱۹۸۸ و Androttola and Cossa)

Waste component	$u_i$ (kg H <sub>2</sub> O/kg wet component)	$OC_i$ (kg C/kg dry component)	$(f_b)_i$ (kg biodeg.C/kg C)
Food waste	0.6	0.48	0.8
Yard waste	0.5	0.48	0.7
Paper and cardboard	0.08	0.44	0.5
Plastics and rubber	0.02	0.7	0.0
Textiles	0.1	0.55	0.2
Wood	0.2	0.5	0.5
Glass	0.03	0.0	0.0
Metals	0.03	0.0	0.0

طبق تحقیقات انجام شده توسط Tabasaram در سال ۱۹۸۲ جزء قابل تبدیل

کربن مواد زائد به گاز در محل های دفن به دمای داخل این محل ها بستگی دارد. این وابستگی به صورت معادله ۸ بیان شده است.

$$(8) \quad (OC_p)_1 = (OC_p)_0 (0.14T + 0.28)$$

که در آن T دمای داخل محل دفن برحسب درجه سانتیگراد می باشد.

در تخمین میزان کربن آلی قابل تجزیه بیولوژیکی می بایستی توجه داشت که مقدار کمی از این مواد توسط شیرابه از محل دفن خارج می شود به خصوص در فاز اسیدی که تولید شیرابه آن بسیار بالا است، و لذا میزان کربن خروجی از میزان اولیه کربن آلی قابل تجزیه کم می گردد.

با توجه به پایه های تئوریک مشترک مدل های تولید گاز و با ترکیب معادلات ۲ و ۷ می توان فرمول میزان گاز تولیدی از محل دفن را به صورت معادله ۹ نمایش داد.

$$(9) \quad Y_{LFG} = 1/867 (OC_p)_1 (f_b)_1 (1-u_1) P_1$$

که در آن  $Y_{LFG}$  درصد گازهای تولیدی برحسب لیتر به ازای هر کیلوگرم ماده زائد  $(\frac{\text{lit gas}}{\text{kg MWS}})$  یا مترمکعب به ازای هر تن ماده زائد می باشد.

برای نمونه با توجه به فرمول فوق و با استفاده از مشخصات آنالیز کیفی مواد زائد جامد شهری تهران، میزان گاز تولیدی از مواد زائد جامد شهری این شهر در محل دفن ۲۶۰ مترمکعب به ازای هر تن ماده زائد بدست

می آید.

### ۶- مدل سازی انتشار گاز از محل های دفن

در حال حاضر نیاز مبرمی به مدل های تولید گاز محل دفن که قادر به پیش بینی نرخ محصول تولیدی بیوگاز باشند، وجود دارد. این مدل ها می توانند هم توسط طراحان و هم توسط بهره برداران محل های دفن مورد استفاده قرار گیرند. مدل های تولید گاز از محل های دفن از سال ۱۹۷۰ به وجود آمده است و تاکنون تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است. مدل های تولید گاز در محل های دفن را می توان به چهار دسته مختلف تقسیم بندی کرد: ۱- مدل های تجربی، ۲- مدل های استوکیومتری، ۳- مدل های بیوشیمیایی و ۴- مدل های اکولوژیکی (Anderotola and Cossu و ۱۹۸۸).

مدل های تجربی شامل سیستم جعبه سیاه می باشد. این مدل ها دارای داده های ورودی و خروجی مشخصی هستند. در این مدل ها یک تابع ریاضی وجود دارد که رابطه بین ورودی و خروجی را براساس یک سری زمانی داده های تجربی، برقرار می کند. مدل های استوکیومتری بر اساس واکنش های استوکیومتری عمومی است که در آن مواد زائد با یک فرمول تجربی نمایش داده می شود. عموماً این مدل ها برای بدست آوردن ماکزیم پتانسیل تولید بیوگاز

کاربرد دارد. مدل‌های بیوشیمیایی بر این اساس است که قابلیت تجزیه بیولوژیکی اجزای مختلف مواد زائد را در محل دفن مورد توجه قرار می‌دهد. مدل‌های اکولوژیکی شامل یک اکوسیستم است که در آن فرآیند برقرار

می‌باشد. این مدل‌ها رابطه اجزای مختلف را توصیف می‌کند. اصولاً این مدل‌ها، مدل‌های بسیار پیچیده‌ای هستند.

از نظر تئوری یک مدل تولید گاز باید شامل سه زیر مدل باشد: ۱- زیر مدل استوکیومتری، ۲- زیر مدل سینتیکی و ۳- زیر مدل نفوذ (دیفیوژن)

۱- زیر مدل استوکیومتری: این زیر مدل، مقدار ماکزیم تئوریک تولید گاز در اثر تجزیه مواد زائد آلی را به ما ارائه می‌کند و به صورت استاتیک می‌باشد یعنی یک رابطه آنی بین ورودی و خروجی مدل وجود دارد. همچنین حالت سیستم در این مدل‌ها پایدار (ایستا) در نظر گرفته می‌شود.

۲- زیر مدل سینتیکی: این زیر مدل به صورت دینامیکی می‌باشد و قادر به ارزیابی نرخ موقت تولید گاز در محل دفن می‌باشد. این زیر مدل می‌تواند هم به صورت یک معادله تجربی که بر اساس معادلات کم و بیش ساده به دست آمده باشد و هم به صورت یک مدل احتمالی به صورت یک سری معادلات

توصیفی تجزیه بیولوژیکی مواد زائد، باشد. همچنین این مدل می‌تواند به صورت یک مدل اکولوژیکی باشد که دینامیک جمعیت میکروبی و مواد غذایی در محل دفن را توصیف می‌کند.

۳- زیر مدل نفوذ (دیفیوژن): این زیر مدل به صورت دینامیکی است و توصیف کننده تغییرات زمان و مکان فشار و ترکیب گاز در محل دفن می‌باشد. از این زیر مدل می‌توان نرخ انتشار و میزان تأثیر سیستم استخراج گازهای تولیدی محل‌های دفن را بدست آورد.

مشکل مدلسازی تولید گاز در محل‌های دفن تنها مربوط به پیش‌بینی مقدار گاز از محل دفن نیست بلکه نرخ و طول مدت تولید گاز نیز جزء مشکلات مدلسازی است. اصولاً معادله عمومی که بر تولید گاز حاکم است می‌تواند به صورت معادله ۱۰ بیان شود.

$$\frac{dc}{dt} = f(t, c^n) \quad (10)$$

که در آن  $t$  زمان و  $c$  مقدار متان یا مقدار ماده آلی قابل تجزیه بیولوژیکی است. این معادله مبین نرخ تجزیه مواد غذایی و نرخ تولید گاز است. با استفاده از معادله فوق می‌توان میزان گاز تولیدی در محل دفن را برای یک لایه بدست آورد. مقدار گاز تولیدی نهایی از جمع گازهای تولیدی تمام لایه‌ها به صورت پیوسته بدست می‌آید. توان  $n$  در این معادله یک متغیر

مستقل است که بیانگر درجه واکنش از نظر سینتیکی می باشد. درجه واکنش صفر به این معنا است که تغییر اندکی در مقدار مواد آلی سبب تأثیر در نرخ تجزیه مواد غذایی یا تولید گاز نمی شود. در بسیاری از محل های دفن برای مدلسازی گازهای تولیدی در بلند مدت از واکنش های درجه صفر استفاده می کنند، زیرا در بلند مدت نرخ تولید متان مستقل از مقدار مواد غذایی باقیمانده است و عوامل محدودکننده در این حالت شامل رطوبت، مواد مغذی و ... می باشد (Bartlatz and Ham, ۱۹۸۹).

اگر چه روشن شده است که عوامل بسیاری چون رطوبت، دما، میزان دسترسی به مواد مغذی و وجود میکروارگانیزم های ضروری در تولید گاز نقش دارند ولی اغلب محققین عقیده دارند که واکنش های درجه اول با داشتن مواد غذایی به میزان مناسب در محل های دفن رخ می دهد. آنها این نظریه خود را با بیان این واقعیت که تولید گاز به تدریج در زمان های طولانی کاهش می پذیرد، تأیید می کنند. ذیالاً بعضی از مهمترین مدل های شبیه سازی شده گازهای تولیدی محل های دفن آورده می شود.

#### مدل Sheldon - Arleta

این مدل به صورت یک مدل دو مرحله ای می باشد و درجه واکنش آن از نوع درجه اول

می باشد. این مدل با توجه به تجارب کاربردی استفاده از لجن بی هوازی فاضلاب برای تولید گاز بدست آمده است و بر پایه مقدار کربن آلی قابل تجزیه بیولوژیکی استوار می باشد. در این مدل فرض شده است که مواد زائد دارای ۲۶ درصد وزنی کربن می باشد که ۳۱ درصد آن را کربن قابل تجزیه سریع و ۶۶ درصد آن را کربن قابل تجزیه کند تشکیل می دهد. به این ترتیب مواد زائد قابل تجزیه بیولوژیکی به دو گروه تقسیم می شود و برای هر طبقه یک نیمه عمر تعریف می شود. کل زمان تولید گاز نیز توسط معادله ۱۱ تعریف می شود.

$$t = t_p \times 0.25 \quad (11)$$

مطابق این معادله ماکزیمم نرخ تولید گاز در این مدل در زمان نیمه عمر بدست می آید. منحنی تولید گاز در این مدل در شکل (a) آورده شده است.

#### مدل Scholl Canyon

این مدل به صورت یک مرحله ای می باشد. در این مدل فرض بر این است که تولید گاز در محل دفن پس از گذشتن از زمان تأخیر خود به بیشترین میزان خود رسیده است و پس از آن پیوسته کاهش پیدا می کند. معادله حاکم بر این مدل توسط معادله ۱۲ نشان داده می شود.

$$\frac{-dL}{dt} = Kt \quad (12)$$

که در آن L حجم گاز تولیدی در زمان t و K ثابت نرخ تولید گاز می باشد. منحنی تولید گاز در این

مدل در شکل (b) آورده شده است.

است.

منحنی تولید گاز این مدل در شکل (C) آورده

شده است.

مدل **Emcon MGM**

این مدل یک مدل کاملاً شناخته شده در محل‌های دفن می‌باشد و ابزار بسیار مفیدی در تخمین پتانسیل گازهای تولیدی در محل‌های دفن می‌باشد. داده‌های اصلی ورودی این مدل شامل مقدار مواد زائد و ترکیبات آن، میزان رطوبت در محل دفن، زمان تأخیر و زمان تبدیل گاز می‌باشد. در این مدل فرض بر این است که مواد زائد از نظر تجزیه پذیری به سه دسته تقسیم می‌شود: ۱- تجزیه پذیر با سرعت بالا، ۲- تجزیه پذیر با سرعت متوسط و ۳- تجزیه پذیر به آرامی. این مدل برای هر یک از این سه دسته به صورت جداگانه میزان گاز تولیدی را محاسبه می‌کند و در نهایت برای ارزیابی گاز نهایی تولیدی از محل، این مقادیر را با هم جمع می‌کند. میزان گاز تولیدی برای هر جزء در این مدل از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$C_i = KK'W_i P_i (1 - M_i) V_i E_i \quad (13)$$

که در آن:

$C_i$ : حجم گاز متان تولیدی از جزء  $i$ ام بر حسب لیتر

$W_i$ : وزن کل مواد زائد مرطوب بر حسب Kg

$P_i$ : درصدی از جزء  $i$ ام در کل مواد زائد

$M_i$ : میزان رطوبت جزء  $i$ ام در محل دفن

$V_i$ : میزان جامدات فرار جزئی جزء  $i$ ام

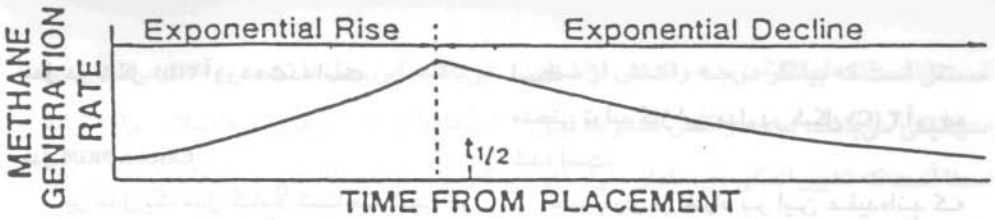
$E_i$ : جزء قابل تجزیه بیولوژیکی جامدات فرار

خشک در جزء  $i$ ام

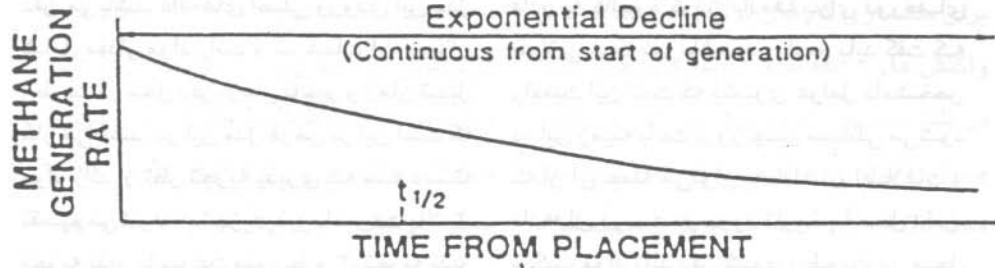
$$K' = 1/5 \quad \frac{\text{Kg COD}}{\text{Kglit/s}} \quad \text{و} \quad K = 351 \quad \frac{\text{lit CH}_4}{\text{Kg COD}}$$

عملیاتی بهره‌برداری خاص اشاره کرد. به طور کلی می‌توان گفت فرآیند رخ داده شده در محل دفن همیشه تحت تأثیر یکسری عوامل نامشخص می‌باشد. این عوامل کنترل‌کننده آنچه در محل دفن رخ می‌دهد، می‌باشند. به همین دلیل بهتر است خروجی و نتایج این مدل‌ها بجای ذکر مقادیر قطعی همیشه به صورت محدوده‌های احتمالی بیان شود. از آنجا که هزینه مدلسازی به مراتب از هزینه انجام آزمایشات در محل کمتر است، ضرورت دارد جهت استفاده بهتر از این مدل‌ها و انطباق بیشتر نتایج آنها با واقعیات منطقه فعالیت‌های زیر انجام شود.

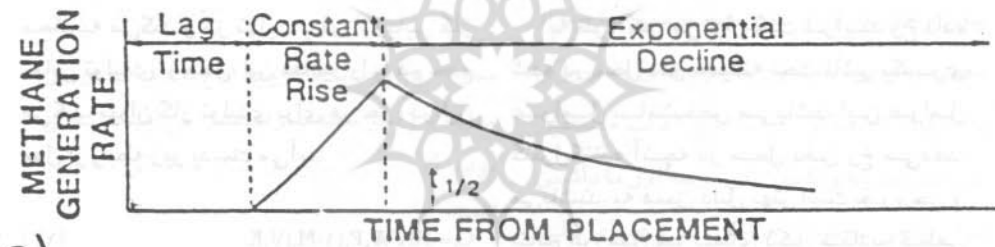
۱- افزایش دانش در زمینه فرآیندهای ناشناخته تولید گاز در محل‌های دفن، ۲- پیشرفت و توسعه روش‌های اندازه‌گیری گازهای تولیدی در محل‌های دفن و ۳- کاربرد صحیح مدل‌های تولید گاز در محل‌های دفن



(a)



(b)



(c)

شکل ۳- منحنی های تولید گاز در مدل های (a) Sheldon- Arleta, Scholl Canyon (b) و (c) EMCON MGM (Paccey and Augenstein, 1991)

دی اکسیدکربن در گاز تولیدی از محل دفن پتانسیل تولید متان تا سال ۱۴۰۰ برای این محل محاسبه شده است (جدول ۴). ستون آخر این جدول پتانسیل کاهش گازهای گلخانه‌ای را در صورت استحصال و بهره‌برداری کامل گازها از این محل، نشان می‌دهد.

۱-۶ انتشار متان در محل دفن کهریزک با استفاده از مدل LANDGEM محل دفن کهریزک از سال ۱۳۴۲ برای دفن مواد زائد شهر تهران مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به آنالیز فیزیکی زباله در شهر تهران و فرض ۵۰ درصد متان و ۵۰ درصد

جدول ۴- تولید متان و پتانسیل کاهش گازهای گلخانه‌ای در محل دفن کهریزک

با استفاده از مدل LANDGEM

سال	تولید متان مترمکعب در سال	پتانسیل کاهش گازهای گلخانه‌ای مترمکعب در سال براساس CO <sub>2</sub>
۱۳۷۸	$2/821 \times 10^6$	$14/105 \times 10^6$
۱۳۸۰	$2/980 \times 10^6$	$14/900 \times 10^6$
۱۳۸۵	$2/261 \times 10^6$	$16/305 \times 10^6$
۱۳۹۰	$2/422 \times 10^6$	$17/160 \times 10^6$
۱۳۹۵	$4/524 \times 10^6$	$17/680 \times 10^6$

### ۷- مهاجرت گازهای تولیدی محل های دفن

ابعاد مختلف تأثیرات مهاجرت گاز از محل های دفن در شکل ۴ نمایش داده شده است. تحقیقات بسیاری پیرامون مهاجرت گاز از محل های دفن توسط فرآیندهای نفوذ و حرکت افقی به عنوان فرآیندهای مهم انجام شده است (Ghaba e, and Redwell ۱۹۸۱). شار دیفیوژنی به دلیل اختلاف غلظت گاز در داخل محیط متخلخل به علت حرکت براونی مولکول های گاز به وجود می آید. شار دیفیوژنی عبارت از میزان گازی است که در واحد زمان از واحد سطح جسم عبور می کند و توسط قانون فیک (Fick) بیان و توصیف می شود (معادله ۱۴).

$$f_D = -\epsilon \rho D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (14)$$

که در آن  $f_D$  شار دیفیوژن ( $gm^{-2}s^{-1}$ )،  $\epsilon_a$  قسمتی از تخلخل خاک که توسط گاز پر شده است (بدون بعد)،  $D$  ضریب دیفیوژن در خاک ( $m^2s^{-1}$ ) و  $\frac{\partial C}{\partial x}$  گرادیان غلظت ( $gm^{-3}$ ) می باشد. در این فرمول  $D$  از معادله ۱۵ بدست می آید.

$$D = D_0 \times \Gamma \quad (15)$$

که در آن  $D_0$  ضریب دیفیوژن در هوا در دمای داده شده و  $\Gamma$  ضریب چولگی می باشد که توسط رابطه ۱۶ قابل محاسبه است.

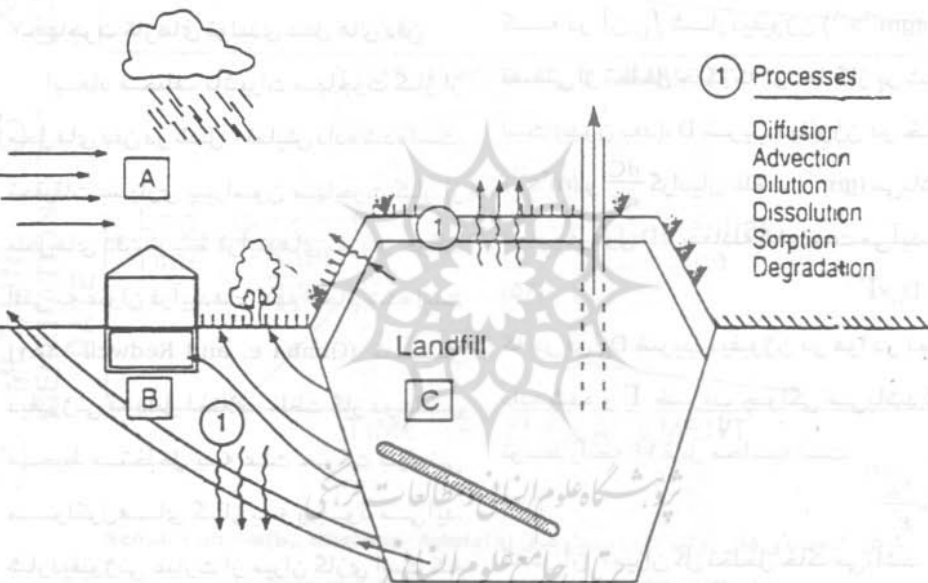
$$\Gamma = \frac{\epsilon^{(n)}}{\epsilon^T} \quad (16)$$

که در آن  $\epsilon$  میزان کل تخلخل خاک می باشد. قانون فیک برای دیفیوژن از میان یک محیط غیراشباع زمانی برقرار است که فضای آزاد بین مولکول ها از اندازه تخلخل آنها کوچکتر باشد به عبارت دیگر مولکول های گاز در داخل فضای متخلخل با هم برخورد کنند، زیرا در غیر این صورت شار دیفیوژن توسط برخورد با دیواره های خلل و فرج انجام می شود

معادله ۱۷ بیان می‌شود. (Ahlkchhead and Willians, ۱۹۹۱) فضای

$$f_A = -c \frac{K_a}{\mu} \frac{\partial P}{\partial X} \quad (17)$$

آزاد بین مولکولی برای گاز متان در شار یک اتمسفر حدود ۵۰۰ آنگستروم می‌باشد. از آنجا که تخلخل خاکها غالباً بسیار کم و در حد آنگستروم می‌باشد لذا در حالت کلی قانون فیک صادق است. شار حرکت افقی گاز در یک محیط متخلخل در اثر تغییرات گرادیان فشار به وجود می‌آید و توسط قانون دارسی به صورت



### 1 Processes

- Diffusion
- Advection
- Dilution
- Dissolution
- Sorption
- Degradation

### A Meteorological factors

- Barometric pressure
- Precipitation
- Temperature
- Wind

### B Soil and geological factors

- Cracks and fissures
- Permeability
- Diffusivity
- Porosity
- Water content
- Organic matter content

### C Waste factors

- Gas production rate
- VOC release
- Internal barriers
- Gas vents
- Lateral migration area

شکل ۴- ابعاد مختلف تأثیرات مهاجرت گاز از محل های دفن



$$K_D = K \frac{\varepsilon_D}{\varepsilon} \quad (18)$$

که در آن  $K$  قابلیت نفوذ هیدرولیکی ( $m^{-2}$ )،  $\varepsilon_D$

قسمتی از تخلخل خاک که توسط گاز پر شده و  $\varepsilon$  کل تخلخل خاک می باشد.

#### ۹- نتیجه گیری

حاصل تجزیه مواد زائد در محل های دفن در شرایط بی هوازی و تحت تأثیر میکروارگانیزم های موجود در خاک، گاز و هوموس می باشد. قسمت عمده گازهای تولیدی

محل های دفن متان و دی اکسید کربن می باشد که در صورت عدم کنترل و بازیافت می تواند مشکل آفرین شود. ایجاد گذرگاههای طبیعی و مصنوعی و کنترل حرکت گاز از راههای حل

این مشکل است. با کاهش منابع انرژی و گسترش و توسعه محل های دفن در جهان فعالیتهای مربوط به کنترل و بازیافت گاز در

محل های دفن روز به روز در حال گسترش است. از دیدگاه زیست محیطی کنترل و بازیافت گاز نه تنها از جهت تولید انرژی بلکه به لحاظ

کنترل گازهای گلخانه ای و سرطانزا نیز حائز اهمیت است. تجارب عملی بیانگر این موضوع است که گازهای تولیدی محل های دفن می تواند به صورت موفق با سایر منابع انرژی جایگزین گردد. بنابراین ضرورت دارد به

مسأله کنترل و بازیافت گاز از محل های دفن توجه بیشتری مبذول گردد.

#### ۸- انتقال و استخراج و بهره برداری از گازهای تولیدی محل های دفن

انتقال و استخراج گازهای تولیدی محل های

دفن از طریق چاههای استخراج صورت

می گیرد. عمق این چاهها عمدتاً تا نزدیک به ۳

متری انتهای محل دفن می باشد. عمق این

چاهها به تراز، شیب کناری و نوع پوشش به

کار رفته در محل دفن بستگی دارد. اگر محل

دفن دارای پوشش خوب و غیرقابل نفوذی

باشد، می توان چاههایی با عمق کم حفر نمود

زیرا قادر به استفاده از خلاء نسبی بالایی محل

دفن برای خارج کردن گاز هستیم.

عمدتاً روشهای بهره برداری از گازهای

تولیدی محل های دفن شامل استفاده مستقیم،

تولید برق، توربین های گازی و پیل های

سوختی است. روشهای استفاده مستقیم از

گازهای تولیدی محل های دفن شامل استفاده

از آن به عنوان سوخت بویلر، گرم کردن و خنک

کردن محل ها، گرمادهی برای صنایع و کاربرد

- 1- Christensen, T.H, Cossu, R. and Stegmann, R. (1996). Landfilling of Waste: biogas. E & FN SPONE.
- 2- Jiunn-Jui, L., Yu-You, L. and Tatsuya, N. (1998). Mathematical Model Production from Landfill Bioreactor. J. ENVIRO engineering, 8, 730-736.
- 3- Mustasem, E.F, Angelos, N.F and James, O.L. (1997). Gas Simulation Models for Solid Waste Landfilling. Environmental Science and Technology, 27, 237-283.
- 4- EPA (1996). Municipal Solid Waste Landfilling. EPA - 453/R-96-004
- 5- EPA (1997). Compilation of Air Pollution Emission Factors, AP-42, 5th ed.



شعبه پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی  
پرتال جامع علوم انسانی