مدلسازی ریاضی پارامترهای فرایند تولید کمپوست

آرمان شاهنظری[۱] ، عباس روحانی[۲]*

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیزاسیون – بازیافت و مدیریت پسماند دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

[۲] استادیار گروه مکانیک بیوسیستم دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

*ایمیل نویسنده مسئول: arohani@um.ac.ir

چکیده

روشهای مدلسازی بطور گسترده در مدلسازی فرایند تولید کمپوست از قبیل پیش‌بینی عملکرد کمپوست، بهبود درک سیستمهای تولید کمپوست، گسترش مفاهیم تئوری جدید و ... استفاده می‌شود. در این پژوهش تعدادی از عوامل مؤثر در تولید کمپوست از جمله انتقال حرارت، جریان هوا و سرعت هوادهی، انتشار بو و انتشار آمونیاک و محتوای رطوبت مورد بررسی قرار گرفت و روشهای پاسکوئیل جی فورد و گاوس برای مدلسازی انتشار بو وآمونیاک و روش المان محدود در مدل هونگ برای انتقال حرارت استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل هونگ برای توده کمپوست نتایج را کمی پایین‌تر از مقدار واقعی پیش‌بینی کرده و همچنین مدل ایجاد شده براساس تئوری گاوسی توانایی پیش‌بینی غلظت آمونیاک در مسیر باد را دارد و هم‌چنین مناسب‌ترین نسبت هوا به مواد آلی برای تهیه کمپوست ۰/۴۱ (هوا در دقیقه به ازای هر کیلوگرم ماده آلی) است.

واژه های کلیدی: کمپوست، المان محدود، مدل هونگ، تئوری گاوسی

مقدمه

سیستم های تولید کمپوست

در حالت کلی سیستم‌های تولید کمپوست به دو دسته محلی (on-site) و غیرمحلی (off-site) تقسیم می‌شوند. سیستم محلی آن دسته را شامل می‌شوند که مواد کمپوست شونده در محل تولید، تبدیل به کمپوست می‌شود. در این سیستم‌ها فرایند تولید به شکل کاملاً طبیعی و کنترل نشده انجام می‌گیرد. اما در سیستم‌های تولید غیرمحلی مواد کمپوست شونده جمع آوری شده و به محلی از پیش تعیین شده منتقل می‌شوند. در این سیستم‌ها فرایند تولید به شکل کنترل شده دنبال می‌شود.

سیستم‌های تولید محلی

این روش کاربرد قدیمی دارد و از یک مخزن شیب‌دار کاملاً آب بندی شده استفاده می‌گردد. شیب این مخزن به خاطر فراهم نمودن امکان حرکت مواد به داخل مخزن طراحی شده است. مواد زائد و فاضلاب خانگی مستقیماً به داخل این مخزن منتقل می‌گردند. هوادهی در این روش از طریق مجاریی که در ارتباط مستقیم با هوای آزاد محیط اطراف هستند انجام می‌شود. مدت زمان تولید

کمپوست در این روش خیلی طولانی‌تر از روش‌های معمول و تجاری است و حتی در بعضی شرایط این مدت تا حدود ۴ سال ادامه پیدا می‌کند.

سیستم‌های تولید غیر محلی

فرایند تولید کمپوست هم به صورت هوازی و هم به صورت بی‌هوازی صورت می‌گیرد، ولی سیستم‌های تولید غیرمحلی کاملاً به صورت هوازی انجام می‌شوند که علت آن کم کردن طول مدت زمان تجزیه بیولوژیکی مواد زائد جامد می‌باشد. تقسیم‌بندی سیستم‌های تولید غیر محلی عبارتند از :

۱-روش برگرداندن توده۲ - روش هوادهی فعال ۳- روش هوادهی غیرفعال ۴- روش تولید کمپوست در راکتور

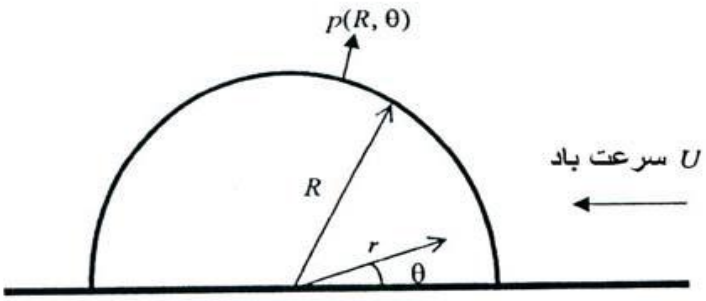
در بعضی از منابع، هوادهی طبیعی را نیز جز این تقسیم‌بندی قرار داده‌اند. در طبقه‌بندی فوق سه گزینه اول به سیستم‌های غیر راکتوری معروف هستند که در این روش تمامی فازهای تولیدی در محیط باز صورت می‌گیرد و برای تولید کمپوست با کیفیت مناسب در این روش نیاز به طراحی خاص توده به منظور هوادهی بهینه می‌باشد.

روش هوادهی طبیعی

این روش یکی از راحت‌ترین و ارزان‌ترین روش‌های محسوب می‌شود که احتیاج به نصب تجهیزات از جمله لوله و سایر امکانات ندارد. هوادهی به طور خیلی ساده از طریق همرفت و یا انتشار ایجاد می‌شود. میزان هوادهی در این روش به مشخصات فیزیکی مواد کمپوست شونده از جمله دانسیته و تخلخل و همچنین ابعاد توده تشکیل شده بستگی دارد. هر چه سطح توده در مقابل حجم آن بیشتر باشد هوادهی به طور مطلوب‌تری صورت می‌گیرد. هوادهی طبیعی در اثر تغییرات فشار ایجاد می‌شود. این تغییرات به صورت یکنواخت نیست بنابراین تمام نقاط توده در معرض هوادهی یکنواخت قرار ندارد.

مدل‌سازی جریان هوا در داخل توده

جریان هوا در داخل توده در دو بعد بررسی و فرض شده است که شکل هندسی توده به حالت نیمدایره باشد. چون تغییرات فشار ناچیز است می‌توان از تراکم‌پذیری هوا صرف نظر کرد. جریان هوا به داخل توده به خاطر اختلاف فشار محیط اطراف توده با خود توده می‌باشد، که این اختلاف فشار با توجه به رابطه ۱ قابل محاسبه است:



شکل ۱- شکل هندسی(نیم دایره) توده کمپوست (کمالی ۱۳۸٦)

$$2(P - P\infty) = \rho U^2(1 - 4sin^2\theta) \quad (۱)$$

که در فرمول فوق $P\infty$ فشار هوای محیط، P فشار سطح توده، U سرعت باد، ρ چگالی هوا،θ زاویه نشان داده شده در شکل می‌باشد. با صرف‌نظر از تراکم‌پذیری هوا، معادله جریان هوا در داخل توده را می‌توان بر اساس معادله لاپلاس بیان کرد:

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{Zx^2} = 0 \quad (۲)$$

φ بیان کننده پتانسیل سرعت در شرایط طبیعی است . با توجه به شرایط مرزی که در رابطه ۱ بیان شده است معادله ۳ به صورت زیر حل می‌شود:

$$\varphi(R,\theta) = \frac{R^2 - r^2}{2\pi}\int_0^{2\pi}\frac{\varphi(\mathrm{R},\mathrm{v})}{R^2 + r^2 - 2rcos(\theta - v)}dv \quad (۳)$$

هوادهی غیرفعال

روش هوادهی غیر فعال برای اولین بار در سال۱۹۷۸ میلادی مطرح گردید. در این روش از یک سری لوله‌های سوراخ‌دار به منظور انجام هوادهی از طریق جریان همرفتی استفاده می‌شود. جریان هوا از طریق همرفتی به خاطر اختلاف دمای بین هوای داخل و خارج توده می‌باشد. در این روش هوادهی مناسب تحت تأثیر طراحی مناسب لوله‌های هوادهی می‌باشد. این لوله‌ها باید جریان مناسبی از هوا را فراهم نمایند و دارای کمترین میزان افت‌های اصطکاکی ناشی از اختلاف فشار پایین که حاصل از نیروهای بایانسی است، باشند. نیروهای ویسکوز که در داخل لوله‌های هوادهی بوجود می‌آیند به خاطر اختلاف فشاری می‌باشندکه به شدت وابسته به سرعت هوا و اندازه لوله‌ها هستند. عدد گراشوف Gr بیان‌کننده نسبت نیروی بایانسی به نیروی ویسکوز می‌باشد که از آن برای ارتباط بین دمای توده کمپوست و جریان هوای همرفتی استفاده می‌شود. این عدد بیان کننده حجم هوای عبوری از یک سطح مقطع در داخل توده می‌باشد این عدد با تغییرات سرعت هوا در توده کمپوست و همچنین خصوصیات فیزیکی توده کمپوست تغییر می‌کند.

$$\mathrm{Gr} = \mathrm{hA\varepsilon\rho^2(T_w - T_a)/((T_w + T_a)/2)/\mu^2} \quad (۴)$$

Gr عدد گراشوف بدون بعد ، h ارتفاع توده ، A مساحت سطح مقطع توده ، ε در صد تخلخل توده کمپوست ، ρ چگالی هوا در دمای محیط kg/m^3 ، Tw ،Ta به ترتیب دمای هوای داخل توده کمپوست و هوای محیط بر حسب درجه کلوین، μ ویسکوزیته هوای محیط بر حسب $kg\ m^{-1}/s^{-1}$ می‌باشد.

مطالعه سرعت هوادهی و سینتیک‌های واکنش در فرایند کمپوست

هدف از انجام این مطالعه تعیین سرعت هوادهی و سینتیک‌های واکنش آن در کمپوست هوازی برخی از زائدات کشاورزی می‌باشد. برای این منظور مواد با مخلوط چمن و زائدات گوجه‌فرنگی و سیب‌زمینی و همچنین بادمجان برای انجام این مطالعه به کار رفته است. در این مطالعه از هفت مدل سینتیکی مختلف به منظور مدلسازی سرعت تجزیه مواد آلی مورد بررسی قرار گرفته است. این مدل‌ها با آنالیزهای آماری خطای مربعات میانگین ریشه‌ها RMSE chi – square λ^2 و کارآمدی مدلسازی آنالیز شدند. بر اساس آنالیزهای آماری این مدل‌ها، بهترین مدل انتخاب شده مدل۵ بوده است:

$$K_t = \frac{\frac{A}{M_c}}{T - c.b}\exp((T.c) - \left(d\frac{M_c}{T}\right)) \qquad (۵)$$

که در این مدل K_T سرعت تجزیه gVS/gVS day ، T دمای فرایند ^0c ، M_c میزان رطوبت روزانه % Wb ، C میزان روزانه دی‌اکسیدکربن در راکتور % و a,b,c,d ثابت‌های واکنش می‌باشند. براساس نتایج به دست آمده از این مطالعه، حداکثر تجزیه مواد آلی و میزان دما در نسبت هوادهی ۰/۴۱ هوا در دقیقه به ازای هر کیلوگرم مواد آلی به دست آمده است.

مطالعه سینتیک فرایند کمپوست‌سازی

به منظور تعیین قابلیت تجزیه بیولوژیکی زائدات و تولید کود مفید لازم است سینتیک فرایند با استفاده از داده‌های به دست آمده از آزمایشات در شرایط کنترل شده مورد مطالعه قرار گیرد. تجزیه مواد آلی در طول زمان از نوع واکنش درجه اول است که به صورت معادله ۶ قابل بیان است:

$$\frac{d(OM)}{dt} = -K_t.OM \qquad (۶)$$

که در این معادله OM کیفیت و قابلیت تجزیه بیولوژیکی جامدات فرار را در هر زمان از فرایند تولید کمپوست بر حسب کیلوگرم ، t زمان بر حسب روز و K_T ثابت واکنش می‌باشد.

مدل ریاضی انتشار بو از مراکز دفن و تولید کمپوست

انتشار بو از مهم‌ترین مشکلات تولید کمپوست و مراکز دفن زباله است. پس فاصله انتشار بو با توجه به شرایط جغرافیایی و آب و هوایی منطقه تولید کمپوست و یا مرکز تولید بو تا مناطق مسکونی و تجاری و اداری ضروری است. مدل ریاضی استفاده شده برای

حل معادلات انتشار بو به روش پاسکوئیل جی فورد و گاوس انجام شده است. در روش پاسکوئیل جی فورد، با استفاده از اطلاعات هواشناسی منطقه ضرایب پراکندگی در جهت جانبی و عمودی و معادله انتشار به روش گاوسی حل شده است. با توجه به انواع مدل‌سازی، از روش مدل‌سازی مجموعه منابع صنعتی برای مدل‌سازی انتشار بو از مرکز دفن و تولید کمپوست کهریزک استفاده شده است. این گونه روشها برای مدل‌سازی انتشار از منابع غیر نقطه‌ای، برای شبیه‌سازی اثرات انتشار از منابع صنعتی مختلف به کار می‌رود. پارامترهای به کار رفته در این تئوری برای نشان دادن لایه مرزی عبارتند از سرعت اصطکاکی که همان سرعت تنش برشی در لایه مرزی است، همان گونه که از تعریف آن پیداست بعد سرعت اصطکاکی دارای بعد سرعت است(U_*)، طول مونین – ابوخوف که برای بیان آثار نیروی رانش (ارشمیدس) روی توربولانس جریان هوا به کار می‌رود. (L_{mo}) دمای اصطکاکی (θ_*) ارتفاع اختلاط (Z_i) و شار گرمایی سطحی (H_s).این پارامترها می تواند از روش لایه مرزی جابه‌جایی (CBL) و لایه مرزی پایدار (SBL) به دست آیند.

$$H_s + \lambda E + G = R_n \qquad (۷)$$

که H_s شار گرمایی محسوس بر حسب $W\ m^{-2}$ ، λE شار گرمایی نهان بر حسب $W\ m^{-2}$ ، G شار گرمایی خاک برحسب Wm^{-2} است. اگر شار گرمایی خاک را برابر $G=0.1R_n$ و شار گرمایی محسوس را برابر $\lambda E= H_s/B_o$ فرض کنیم، که B_o نسبت باون سطح است، معادله ۷ به صورت معادله ۸ در می‌آید :

$$\mathrm{Hs} = \frac{0.9R_n}{(1 + 1/\mathrm{Bo})} \qquad (۸)$$

در معادله ۸، R_n برابر مقدار زیر است:

$$R_n = \frac{(1-r)R + c_1 Tref^{\,6} - \sigma sBTref^{\,4} + c_2 n}{1 + c_2} \qquad (۹)$$

برای محاسبه طول مونین ابوخوف و تعیین کلاس پایداری از رابطه ۱۰ استفاده می‌کنیم :

$$L_{mo} = -\frac{\rho CpTref\,U_*^3}{\mathrm{KgHs}} \qquad (۱۰)$$

پس از محاسبه طول مونین ابوخوف، تابش خالص و با توجه به سرعت باد و پوشش ابری کلاس پایداری تعیین می‌شود. پارامترهای به دست آمده و پروفیل‌های سرعت باد و گرادیان دمای بالقوه عمودی برای چند ساعت مطالعه شد. سرعت باد در ارتفاع مرجع برابر ۱۰ متر (طبق استاندارد اندازه گیری سرعت باد)، در این ساعات ۳/۶ متر بر ثانیه و دمای محیط ۸/۴ درجه سلسیوس بوده است. نسبت باون، توان بازتاب و زبری سطحی منبع به ترتیب طبق جداول EPA برابر ۱/۵ و ۰/۳۵ و ۱ می‌باشد به دلیل این که داده‌های موجود هواشناسی استان تهران تا سال ۲۰۰۸ موجود است، پس روز و زمان شبیه سازی ۱۲ بعداز ظهر در ۱۵ ام دی ماه برابر ۶ ژانویه سال

۲۰۰۸ انتخاب شده است. پارامترهای پراکندگی پاسکوئیل جی فورد در جهت‌های افقی و عمودی برای یک منبع نقطه ای از روابط ۱۱ تا ۱۳به دست می‌آیند:

$$\sigma y = 465.11628(x).\tan(TH) \quad (۱۱)$$

$$TH = 0.01745(C - (d)Ln(x)) \quad (۱۲)$$

$$\sigma z = ax^b \quad (۱۳)$$

در معادلات ۱۱ تا ۱۳، X فاصله در جهت باد بر حسب کیلومتر، TH زاویه بر حسب رادیان و ضرایب C و d از جداول راهنمای مجموعه منابع صنعتی سازمان حفاظت از محیط زیست امریکا استفاده شده است. فواصل مجازی عمودی و جانبی در معادله پخش گاوسی برای یک منبع نقطه ای ایده آل است. اما منبع حجمی ابعاد اولیه جانبی و افقی خاص خود را دارد. در این شرایط X_y فاصله جانبی و X_z فاصله عمودی مجازی در مقدار ضرایب پراکندگی تاثیر خواهند داشت. در منبع حجمی ضرایب پراکندگی در مرکز منبع دیگر برابر صفر نخواهد بود و برابر با مقادیر زیر است :

$$\sigma_{y0} = \frac{W}{4.3} \quad (۱۴)$$

$$\sigma_{z0} = \frac{H}{2.15} \quad (۱۵)$$

معادله انتشار آمونیاک (Dispersion)

غلظت در سطح زمین در گیرنده در جهت باد یا قسمتی از منبع سطحی با انتگرال دوبل در جهت باد X یا خلاف جهت باد Y برابر است با :

$$C = \frac{QK}{2\pi u_s \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-0.5\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]\left\{\exp\left[\frac{-(z-h_i)^2}{2{\sigma_z}^2}\right] + \exp\left[\frac{-(z+h_i)^2}{2{\sigma_z}^2}\right]\right\} \quad (۱۶)$$

که در این معادله Q سرعت انتشار از منبع سطحی بر حسب گرم بر ثانیه، K ضریب واحد مقیاس گذاری، U_s سرعت باد در ارتفاع مرجع برابر ۱۰ متر، Z ارتفاع از سطح زمین و H_E ارتفاع موثر منبع است. به طور کلی H_E برابر ارتفاع فیزیکی منبع انتشار یافته است.

مدل ریاضی تولید و انتقال حرارت

برای مدل‌سازی تولید حرارت در کمپوست، از مدل هونگ استفاده شده است. مدل هونگ در سال ۲۰۰۰ توسط هونگ ارائه شد. در مدل هونگ فرض بر این است که توده کمپوست شامل چهار جز است: مواد آلی با زنجیره کربن کربن بزرگ هستند که قابل تبدیل به مواد ساده‌تر می‌باشند و تجزیه آنها انرژی‌زا است. این مواد را در اصطلاح مواد غذایی می‌نامند و با علامت S مشخص می‌کنند. این مواد شامل چربی‌ها، پروتئین‌ها، مواد سلولزی و... هستند. مواد غذایی می‌توانند به عنوان منبع تغذیه میکروارگانیسم‌ها در فرایند وارد شده و تجزیه کردند. میکروارگانیسم‌های موجود در توده، در طی فرایند تولید مثل می‌کنند. نسبت وزنی میکروارگانیسم‌ها به وزن

توده با علامت X مشخص می‌شود. بخش مهمی از وزن توده مربوط به رطوبت موجود در آن می‌باشد. رطوبت توده کمپوستی، تأثیر مشخصی بر کیفیت و کمیت رشد فرایند در توده دارد. با شروع فرایند از میزان مواد غذایی کاسته می‌شود. سرعت تغییر در محتوای مواد غذایی توده به درصد مواد غذایی و میکروارگانیسم‌ها در توده وابسته است. رابطه‌ای که در مدل هونگ برای سرعت تغییرات مواد غذایی ارائه شده است، مطابق رابطه ۱۷می‌باشد:

$$\frac{ds}{dt} = -K'X\left(\frac{Sx}{k_0X + s}\right) + XKd \qquad (۱۷)$$

با کاهش مواد غذایی و تولید کمپوست، مقدار توده زنده نیز افزایش می‌یابد. افزایش توده زنده نیز وابسته به درصد مواد غذایی و درصد توده زنده کمپوست است. از فرمول ۱۸محاسبه می شود:

$$dx = \mu m\left(\frac{sx}{k_0X + S}\right) - bx \qquad (۱۸)$$

مقادیر پارامترها برای مواد مختلف به صورت تجربی به دست می‌آید. ضریب 'K که به عنوان ضریب تأثیر عوامل محیطی در رابطه ۱۷ معرفی شده، عوامل رطوبت، دما، فضای موجود مابین ذرات و میزان اکسیژن را در جواب نهایی تاثیر می‌دهد:

$$K' = k_t k_m k_{fas} k_{o2} \qquad (۱۹)$$

که در آن K_T ضریب تصحیح دما، K_m ضریب تصحیح رطوبت، K_{fas} ضریب تصحیح فاصله بین ذرات و K_{o2} مربوط به مقدار اکسیژن موجود در توده می‌باشد.

ضریب تصحیح دما : رشد میکروارگانسیم‌ها در توده نیازمند شرایط دمایی مناسبی است. سرعت فعالیت، رشد و تولید مثل این موجودات در دماهای پایین بسیار پایین است. با افزایش دما تا بازه ۵۵ تا ۷۰ درجه سانتیگراد می‌توان به بهترین شرایط دمایی برای این موجودات دست یافت. در دماهای بالاتر از ۷۰ فعالیت میکروارگانیسم‌ها کمتر شده و به تدریج این موجودات از بین می روند. ضریب تصحیح حرارت برای در نظر گرفتن این تغییرات تعریف شده و به صورت رابطه ۲۰ تا ۲۲ فرموله گردیده است :

$$K_t = \exp\left\{\frac{-Ea}{Ra}\frac{1}{T+273} - \frac{1}{333}\right\} \; for\; T \le 60 \qquad (۲۰)$$

$$K_t = \frac{80 - T}{80 - 60} \; for\; 60 \le T \le 80 \qquad (۲۱)$$

$$K_t = 0 \; for\; T \ge 80 \qquad (۲۲)$$

ضریب تصحیح محتوای رطوبت : بر طبق آزمایشات، برای سرعت رشد میکروبی توده کمپوست و محتوای رطوبت توده روابطی به دست آمده است. هنگامی که محتوای رطوبت توده W از محتوای رطوبت بحرانی W_a که رطوبت حداقل برای رشد میکروب‌هاست کمتر باشد، رشد توده زنده کمپوست متوقف خواهد شد. رطوبت‌های بالای ۸۰٪ نیز شرایط رشد را از میکروب‌ها سلب خواهد کرد.

$$K_m = 0 \; for \; w \leq wa \; \& \; w \geq 80\% \qquad (۲۳)$$

برای محتوای رطوبت بالاتر از حد بحرانی در شرایطی که که رطوبت کمتر از ۶۰٪ باشد، افزایش رطوبت باعث بهبود شرایط فرآیند خواهد شد.

$$K_m = \frac{w - w_a}{K_a + w} \; for \; w_a \leq w \leq 60\% \qquad (۲۴)$$

اگر رطوبت از ۶۰٪ بالاتر برود، تأثیر منفی بر سرعت رشد خواهد داشت و باعث کاهش فعالیت میکروبی خواهد شد. در این حالت ضریب تصحیح از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$K_m = \frac{w-w_a}{K_a+W} \frac{80-w}{20} \; for \; 60\% \leq w \leq 80\% \qquad (۲۵)$$

مقادیر W_a و K_a وابسته به نوع ماده توده کمپوست می‌باشد و برای مواد مختلف از طریق تجربی به دست می‌آید.

ضریب تصحیح فاصله بین ذرات : فاصله خالی میان اجزا در فرایند کمپوست به دلیل رابطه مستقیم آن با انتقال اکسیژن و گازهای تولیدی بسیار مهم و تأثیرگذار است. در مدل هونگ ضریب تصحیح فاصله میان ذرات از رابطه ۲۶ محاسبه می شود.

$$K_{fas} = \frac{1}{1 + e^{-23.675 fas + 8.4945}} \qquad (۲۶)$$

fas فاصله بین ذرات است که به دلیل تلاشی مواد اولیه در طی فرایند، مقدار دقیق آن با گذشت زمان کمتر می‌شود ولی به دلیل ناچیز بودن این تغییر در مقایسه با اثر تغییر دما و رطوبت، آن را در طی فرایند ثابت در نظر می‌گیریم. مقدار عددی فاصله بین ذرات به صورت تجربی مشخص می‌شود.

ضریب تصحیح میزان اکسیژن: نفوذ اکسیژن به لایه‌های درونی توده که از طریق منافذ موجود در توده صورت می‌گیرد محدود است. مدل‌سازی دقیق نفوذ اکسیژن در لایه‌ها بسیار مشکل است. در مدل هونگ برای ضریب اکسیژن رابطه ۲۷ پیشنهاد شده است:

$$K_{O_2} = \frac{\text{vol\%o2}}{K_o + vol\%o2} \qquad (۲۷)$$

$\text{Vol\%}O_2$ نشان‌دهنده درصد گاز اکسیژن در هوای ورودی است. اگر ذرات به خوبی با یکدیگر مخلوط شده باشند، فاصله میان ذرات در نقاط مختلف توده تقریبا یکسان خواهد بود. K_Oضریبی است که با در نظر داشتن سرعت ورود و خروج اکسیژن و میزان اکسیژن هوا محاسبه می‌شود. اندازه ذرات نیز در این ضریب تأثیرگذار است.

بقای جرم

در فاصله زمانی t-1 تا t ، جرم اجزای توده دچار تغییر می‌شود. در هر بازه زمانی با استفاده از معادلات ارائه شده می‌توان سرعت تغییرات مواد غذایی و میکروارگانیسم‌ها را تعیین نمود. مقدار این مواد در هر زمان با استفاده از معادلات بقای جرم قابل محاسبه است. برای اجزای توده می‌توان نوشت:

$$\frac{dM(s)}{dt} = M(St-1)M(St) \quad (۲۸)$$

$$\frac{dM(x)}{dt} = M(xt-1)M(xt) \quad (۲۹)$$

$$\frac{dM(w)}{dt} = M(wt-1)M(wt) \quad (۳۰)$$

تعادل رطوبت

رابطه مستقیمی بین سرعت تبخیر آب، محتوای رطوبت و سرعت گردش هوا در توده وجود دارد. برای محاسبه میزان رطوبت در توده می‌توان از رابطه ۳۱ بهره برد:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{-\lambda}{f\frac{w}{m}} \; that\; j = \frac{18}{22.4}\frac{Ps}{P0-Ps} \quad (۳۱)$$

رابطه میان فشار هوا و فشار بخار اشباع را می‌توان از رابطه۳۲ به دست آورد:

$$\frac{Ps}{P0} = \exp(A - \frac{B}{T+D}) \quad (۳۲)$$

در این رابطه B،A و D از طریق تجربی به دست می‌آیند که مقدار آنها برابر است با A=233.9 و B=3993.7 و D=11.961

روش المان محدود

معادلات دمایی را می توان به صورت رابطه ۳۳ نوشت :

$$T(x,y,t) = [N(x,y)]\{T(t)\} \quad (۳۳)$$

که در آن [N] ماتریس درون‌یابی توابع المان‌ها و {T} نشان‌دهنده دمای نودها است. بردار گرادیان دما را می توان به صورت رابطه ۳۴ نوشت :

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \end{pmatrix} = [B(x,y)]\{T(t)\} \quad (۳۴)$$

با استفاده از معادلات دیفرانسیل و شرایط مرزی، شکل المان محدود زیر برای معادلات استخراج می‌شود :

$$[c]\{T\} + \left[[K_c] + [K_h] + [K_{hs}]\right]\{T\} = \{Q_c\} + \{Q_q\} + \{Q_Q\} + \{Q_h\} \quad (۳۵)$$

که ماتریس‌های داده شده با انتگرال‌گیری در روی سطح و یا روی محیط به صورت روابط ۳۶ تا ۴۳ به دست می‌آیند:

$$[c] = \int_A \rho c\{N\}[N]dA \quad (۳۶)$$

$$[K_c] = \int_A [B]^T K[B]dA \quad (۳۷)$$

$$[K_h] = \int_A [N]^T h[N]ds \quad (۳۸)$$

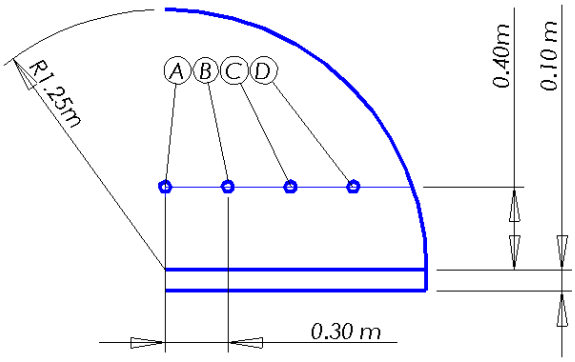
$$[K_{hs}] = \int_s h\{N\}[N]dA \quad (۳۹)$$

$$[Q_c] = -\int_A (q.n)\{N\}ds \quad (۴۰)$$

$$[Q_Q] = \int_s Q\{N\}dA \quad (۴۱)$$

$$[Q_q] = -\int_s q_s\{N\}dA \quad (۴۲)$$

$$[Q_h] = -\int_s hT_a\{N\}ds \quad (۴۳)$$



شکل ۲ – شکل شماتیک برش نیم برش عرضی پشته کمپوست به همراه جانمایی نقاط داده برداری (غفارنژاد۱۳۸۹)

که در آن [c] ماتریس ظرفیت گرمایی، $[K_c]$ ماتریس رسانش، $[K_h]$ ماتریس جابه‌جایی، $[K_{hs}]$ ماتریس جابه‌جایی سطحی، Q_c بردار بار رسانش، q بردار انتقال گرمای جابه‌جایی، n بردار یکه نرمال در سطح، Q_Q بردار بار معادل تولید حرارت داخلی، Q_q بردار بار گرمایی سطحی، Q_h بردار بار معادل جابه جایی سطحی است.

بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به نوع ضایعات باید در طراحی سیستم تولیدی برای کمپوست تغییراتی را ایجاد نمود، نوع مواد مصرفی، چگونگی جداسازی مواد، کنترل فرایند در طول مدت زمان تولید کمپوست، وسایل و امکانات بر روی کیفیت نهایی مؤثر است. میان معیارهای ارزیابی متعددی که برای ارزیابی سیستم تولید کمپوست وجود دارد سه مورد از این معیارهای ارزیابی برای تولید کمپوست از مواد زائد شهری قابل بررسی و تأمل است: ۱- کیفیت مواد تولیدی ۲ – درصد مواد پس‌زده شده از سیستم ۳- نرخ بازیافت مواد. کیفیت کمپوست در واقع مربوط به نوع عملکرد سیستم در مدت زمان تولید و هم چنین میزان و درصد مواد مختلف در توده کمپوست می‌باشد. درصد مواد پس زده شده مربوط به موادی می‌شود که غیر قابل تبدیل به کمپوست هستند و باید دفن شوند که این مواد روی کیفیت محصول نهایی تأثیرگذار هستند. همچنین مناسب‌ترین نسبت هوا به مواد آلی برای تهیه کمپوست کردن زائدات کشاورزی ۰/۴۱ (هوا در دقیقه به ازای هر کیلوگرم مواد آلی) است.

روش حل المان محدود در مدل هونگ برای توده کمپوست، نتایج را کمی پایین‌تر از مقدار واقعی پیش بینی می‌کند. در شرایطی که مقادیر به دست آمده برای پارامترهای میانگین مربع خطا، ماکزیمم درصد خطا، ماکزیمم اختلاف راضی کننده باشد می‌توان از حل عددی مدل هونگ برای تخمین دما در توده‌های کمپوستی استفاده نمود و برای اصلاح خروجی، مقدار متوسط خطای ۳ درجه سانتی گراد را به نتایج به دست آمده اضافه نمود. و همین طور مدل ایجاد شده بر اساس تئوری توده گاوسی، توانایی پیش بینی غلظت آمونیاک در مسیر باد را دارد. غلظت آمونیاک در فاصله مجازی برابر ۲۰ متر از مرکز منبع، بیشینه مقدار خود را دارد و تقریباً برابر ۱۸۰ میلی گرم بر متر مکعب است، این مقدار با دور شدن از مرکز منبع در جهت باد کاهش می‌یابد و تقریباً در فاصله ۲ کیلومتری از مرکز منبع به صفر می‌رسد.

منابع

نجات زاده باراندوزی. ف ، غلامی بروجنی ف.ا. ۱۳۸۷. مطالعه سرعت هوادهی و سنتیک های واکنش در فرایند کمپوست سازی برخی از زائدات کشاورزی.

داوودی. س.م ، محمد امینی. م ، رمضانی. ل.۱۳۹۲. بررسی فرایند تولید کمپوست از پسماندهای شهر تهران. مرکز مطالعات و برنامه ریزی شهر تهران گزارش شماره ۲۳۲

رساپور. م ، مدنی شاهرودی .ه. ر ، کمالی .س.م ، عباسی. س. ۱۳۸۶. مقایسه انواع مختلف سیستم های تولید کمپوست و نحوه کارکرد آنها. سومین همایش ملی مدیریت پسماند.

غفارنژاد مهربانی. آ ، تاجداری.م ، شیرازی .م. ۱۳۸۹ حل عددی فرایند تولید و انتقال حرارت در کمپوست پشته ای با استفاده از روش المان محدود.

یوسفی. م ، اسدالله فردی.غ ، الیاسی .س ، اسدی. م. ۱۳۹۴. توسعه مدل ریاضی انتشار بو از مراکز دفن و تولید کمپوست کهریزک مطالعه موردی انتشار آمونیاک. مجله علمی – پژوهشی عمران مدرس.

Hamoda, M.F., and H.A.Qdais., and A.J. Newham.1998.Evaluation of municipal solid waste composting. Resources Conservation and Recycling 23, 209-223.

Holmes, N.S., and L. Morawska., A Review of Dispersion Modelling and its application to the dispersion of particles. Atmospheric Enivronment 40(30) 5902-5928.

Sweeten, j.M., P.J Watts. 1995. Toward a better regulatory model for odour. in Proceeding of the Feedlot Waste Management Conference Queensland Australia.

Arya, S. 1999. Air pollution meteorology and dispersion. Oxford University Press. New York, N.Y.

U.S. Environmental protection agency User's guide for the industrial source complex (ISC3) dispersion, Volume II, description of model algorithms, September, 1995.

Hall, S. 1998. Temperature feedback and control via aeration rate regulation in biological composting systems. Ph.D. Dissertation. Cornell University, Ithaca. NY.

Hamelers, H.V.M., Modeling composting kinetics: a review of approaches. Rev. Environ. Sci. Technol. 3, 331–342. 2004.

Haug, R.T. 1993. The Practical Handbook of Compost Engineering. Lewis Publishers, Boca Raton, USA.

Kishimoto, M., and C. Preechaphan., and T. Yoshida., and H. Taguchi. 1987. simulation of anaerobic composting of activated sludge a statisticalprocedure. World J.Microbiol Biotechnol.3, 113-123.

Mason, I.G. 2006. Mathematical modeling of the composting process: a review. Waste Manage. 26, 3–21.

Nakasaki, K., and J. Kato., and T. Akiyama., and H. Kubota. 1987. A new compoting model and assessment of optimum operation for effective drying of composting material.J.Ferment. Technol.65,441-447.

Qin, X.S., and G.H. Huang., and G.M. Zeng., and A. Chakma., and B.D. Xi. 2007 A fuzzy composting process model. Air Waste Manage. Ass. 57, 535–550.

Zhentong, L., and L. Hongwei., and R. Lixia., and H. Li. 2013. Experimental and modeling approaches for food waste composting: A reviw.

Das, K.H., and M. Keener. 1997. Numerical model for the dynamic simulation of a large scale composting system. T. ASAE. 40, 1179–1189.

Sun, w., and G.H. Huang., and G.M. Zeng., and X.S. Qin., and H. Yu. 2011. Quantitative effects of composting state variables on C/N ratio through GA-aided multivariate analysis. Sci. Total Environ. 409, 1243–1254.