

## کمپوست سازی بیولوژیکی از برخی زائده های آلی کشاورزی و بررسی مدل های سینتیکی میکروارگانیسیم ها

فتح اله غلامی بروجنی<sup>۱</sup>، فاطمه نجات زاده<sup>۲\*</sup>

۱. گروه بهداشت محیط، مرکز تحقیقات علوم بهداشتی، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ایران

۲. گروه کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوی، خوی، ایران

### چکیده

**سابقه و هدف:** هدف از انجام این مطالعه تعیین سرعت هوادهی و سینتیک های واکنش آن در کمپوست هوازی برخی از زائده های کشاورزی می باشد.

**مواد و روش ها:** در این مطالعه به منظور ایجاد سرعت های هوادهی مختلف از چهار راکتور با هوادهی مکانیکی و یک راکتور با هوادهی طبیعی استفاده شده است. میزان تغییرهای غلظت دی اکسید کربن و دما در سه نقطه از راکتور پایش شده است. میزان رطوبت، pH و میزان مواد آلی به صورت روزانه پایش شد. متغیرهای کنترل کننده فرآیند (CO<sub>2</sub>، دما، pH و میزان رطوبت) به عنوان عوامل مداخله کننده در فرآیند و تجزیه بیولوژیکی مواد آلی به عنوان پارامتر بررسی راندمان فرآیند به کار گرفته شده اند. در این مطالعه هفت مدل سینتیکی مختلف به منظور مدل سازی سرعت تجزیه بیولوژیکی مواد آلی مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه مواد با مخلوط چمن و زائده های گوجه فرنگی، سیب زمینی و هم چنین بادمجان به کار رفته است.

**یافته ها:** بر اساس نتایج به دست آمده چهار مدل سینتیکی از این مدل ها در این مطالعه کاربرد داشتند. این مدل ها با آنالیزهای آماری خطای مربعات میانگین ریشه ها (RMSE)، (λ<sup>2</sup>)، chi-square و کارآمدی مدل سازی modeling efficiency (EF) آنالیز شدند. بر اساس آنالیزهای آماری این مدل ها، بهترین مدل انتخاب شده مدل زیر بوده است:

$$K_T = \frac{a}{T - (C.b)} \cdot \exp\left[\left((T.c) - \left(d \cdot \frac{M_c}{T}\right)\right)\right]$$

که در این مدل K<sub>T</sub> سرعت تجزیه (gVS/gVS day)، T دمای فرآیند (°C)، M<sub>c</sub> میزان رطوبت روزانه (%Wb)، C میزان روزانه دی اکسید کربن در راکتور (/) و a، b، c و d ثابت های واکنش می باشند.

**بحث:** بر اساس نتایج به دست آمده از این مطالعه، حداکثر تجزیه بیولوژیکی مواد آلی و میزان دما در نسبت هوادهی ۰/۴۱ هوا در دقیقه به ازای هر کیلوگرم مواد آلی به دست آمده است.

**نتیجه گیری:** بنابراین، این مقدار هوا در فرآیند بیولوژیکی کمپوست سازی این زائده های کشاورزی می تواند مورد استفاده قرار گیرد.

**واژه های کلیدی:** کمپوست، زائده های کشاورزی، سرعت هوادهی، سینتیک، میکرو ارگانیسیم

### مقدمه

مقدار زائده های تولیدی جهان روز به روز به موازات افزایش جمعیت رو به افزایش است. زائده های آلی مواد زائد جامد نقش مهمی در آلودگی محیط زیست دارند. فرآیندهای دفن در زمین، سوزاندن، پیرولیز، بیوگاز و کمپوست کردن از جمله روش های دفع مواد زائد آلی می باشند. روش های کمپوست و

### نویسنده مسئول:

گروه کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوی، خوی، ایران

پست الکترونیکی: fnejatzadeh@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۵/۱

اگرچه این مطالعه‌ها نمی‌توانند شرایط واقعی را در کمپوست-سازی به‌طور کامل شبیه‌سازی کنند ولی برای درک اثر پارامترهای مختلف به‌طور جداگانه در این فرآیند مفید باشند.

## روش کار

### مواد کمپوست

در این مطالعه مواد کمپوست شامل چمن (۵۴٪)، زائده‌های گوجه‌فرنگی (۱۰٪/۶)، زائده‌های بادمجان (۱۵٪/۴) و زائده‌های فلفل (۲۰٪) مورد استفاده قرار گرفته‌است که ویژگی‌های کامل این زائده‌ها در جدول شماره ۱ آورده شده است. pH و هدایت الکتریکی بعد از حل کردن مواد در آب با نسبت ۱/۱۰ (حجم/وزن) اندازه‌گیری شد. نیتروژن کج‌دال با استفاده از روش استاندارد اندازه‌گیری شد. عناصر معدنی (P، N (%))، Zn، Mg (ppm)، Fe (ppm)، C/N، C (%)، K (%)، Mn (ppm)، Cu (ppm)، Ca (ppm)، EC، (ppm)، OM (%)، MC (%)، pH، (milimhos/cm) بعد از معدنی شدن با استفاده از اتمیک ایزربشن (۸) اندازه‌گیری شدند. مقدار فسفر با روش رنگ‌سنجی اندازه‌گیری شد.

جدول ۱- ویژگی‌های شیمیایی مواد زائد مورد آزمایش

مخلوط مواد	چمن	فلفل	بادمجان	گوجه-فرنگی	
N (%)	۳/۷۳	۱/۹۵	۱/۵۵	۱/۹	
P (%)	۰/۴	۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۱۸	
K (%)	۲/۹۸	۲/۵۸	۲/۵۷	۴/۱۱	
C (%)	۴۵/۶۷	۴۹/۱۱	۴۸/۴۴	۱/۶ ۴۷	
C/N	۱۱/۸۳	۲۵/۱۸	۳۱/۲۵	۲۴/۸	
Fe (ppm)	۸۹۶	۱۷۶	۱۵۴	۱۰۵	
Mg (ppm)	۰/۵۶	۰/۷۵	۰/۴۴	۰/۹	
Zn (ppm)	۳۹	۳۹	۲۸	۸۱	
Mn (ppm)	۱۵۶	۳۸	۳۵	۷۰	
Cu (ppm)	۴۷/۵	۲۲/۴	۴۱	۶۳	
Ca (ppm)	۱/۶۷	۱/۵۱	۱/۴۷	۲/۱۳	
EC (milimhos/cm)	۰/۹۸	۳/۹۸	۲/۷۳	۰/۳۸	
pH	۶/۲۴	۵/۵۷	۵/۹۶	۷/۶۲	
MC (%)	۷۳/۴	۷۰/۴	۷۷/۳	۸۴/۹	
OM (%)	۸۲/۲۱	۸۸/۴	۸۷/۲	۸۴/۹	
MC: مقدار رطوبت	OM: مواد آلی				

### راکتورهای تولید کمپوست

هوادهی با استفاده از بلوئر انجام شد و راکتور شاهد با روش طبیعی هوادهی شد. دوره‌های هوادهی در طول یک ساعت ۱۵ دقیقه انجام شد که با استفاده از تایمر تنظیم شد. در حین انجام فرآیند کمپوست‌سازی هیچ‌گونه آبی به توده اضافه نشده

بیوگاز باعث کاهش خطرهای زیست‌محیطی شده و هم‌چنین باعث تولید محصول‌های اقتصادی از زائده‌ها می‌شوند. کمپوست یک فرآیند بیوشیمیایی تجزیه مواد آلی به مواد سالم، غیر مضر و سازگار با محیط‌زیست است. فرآیند کمپوست را می‌توان به‌عنوان یک فرآیند تجزیه هوازی میکروبی کنترل شده اطلاق نمود که مواد آلی را تثبیت نموده که این مواد می‌توانند برای بهبود خاک و حاصل‌خیزی مورد استفاده قرار گیرند (۱، ۴، ۶، ۱۲). فاکتورهای مؤثر در فرآیند کمپوست‌سازی شامل پارامترهای محیطی (دما، رطوبت، pH و هوادهی) و پارامترهای مرتبط با سوبسترا (نسبت کربن به نیتروژن، اندازه ذرات و میزان نوترینت‌ها) است (۳، ۱۶). کمپوست هوازی تجزیه مواد آلی در حضور اکسیژن است (۱۸). محصول اصلی تولیدی متابولیسم میکروبی عبارتند از: دی-اکسید کربن، آب و حرارت است (۷، ۱۹). با توجه به این‌که این فرآیند هوازی است، وجود اکسیژن در این فرآیند ضروری است. روش‌های اصلی هوادهی که منجر به اکسیژن رسانی به توده کمپوست است عبارتند از: هم‌زدن فیزیکی توده، هوادهی طبیعی و هوادهی مکانیکی در راکتورهای تولید کمپوست هوادهی با استفاده از بلوئر انجام است. هوادهی به‌عنوان یکی از فاکتورهای مهم در تولید کمپوست هوازی مطرح است (۵، ۱۳). در این فرآیند مشکل اصلی میزان هوادهی مورد نیاز در راکتور است. در صورتی که میزان هوادهی زیاد باشد، انرژی مورد نیاز راکتور افزایش می‌یابد و به دنبال آن دمای توده کاهش می‌یابد و در صورتی که هوادهی ناکافی باشد فرآیند به سمت بی‌هوازی شدن می‌رود (۴). برای ایجاد شرایط هوازی حداقل غلظت اکسیژن موجود در توده بایستی ۵ درصد باشد (۱۴، ۱۰). نسبت‌های هوادهی متفاوتی در مطالعه‌های انجام شده گزارش شده است به‌عنوان مثال  $1-1 \text{ air/min kg}_{\text{om}}$  و  $0.34-0.16 \text{ air/min kg}_{\text{om}}$  (۶)،  $0.1-0.15 \text{ air/min kg}_{\text{om}}$  (۷)،  $0.34-0.1 \text{ air/min kg}_{\text{om}}$  (۸) و  $0.69 \text{ air/min kg}_{\text{om}}$  (۹). اگرچه مطالعه‌های زیادی به‌منظور تعیین میزان هوادهی برای تجزیه مواد زائد انجام شده است ولی هیچ نتیجه آزمایشگاهی مناسبی حاصل نشده است. در این مطالعه، اثر میزان هوادهی روی کمپوست شدن برخی از زائده‌های کشاورزی و نسبت هوای مورد نیاز تعیین می‌گردد. سرعت تجزیه روزانه با اصلاح مدل‌های سینتیکی و استفاده از مقادیر اندیکاتورهای مناسب قابل اندازه‌گیری است. بنابراین فرآیند کمپوست‌سازی قابل شبیه‌سازی است و هم‌چنین محصول‌های نهایی در طراحی و مدیریت فرآیند کمپوست‌سازی قابل پیش‌بینی است. این مدل‌ها با استفاده از روش‌های مختلف آماری آنالیز شدند.

گیرد. تجزیه مواد آلی در طول زمان از نوع واکنش درجه اول است که به صورت معادله زیر قابل بیان می باشد (۱):

$$\frac{d(OM)}{dt} = -K_T \cdot OM \quad (2)$$

که در این معادله OM کیفیت و قابلیت تجزیه بیولوژیکی جامدات فرار را در هر زمان از فرآیند تولید کمپوست برحسب کیلوگرم، t زمان برحسب روز و  $K_T$  ثابت واکنش می باشد. در این مطالعه از هفت مدل سینتیکی برای مدل سازی سرعت تجزیه مواد آلی مورد استفاده قرار گرفته شده است. این مدل ها در جدول شماره ۳ آورده شده است. مدل های ۱ و ۴ توسط Haung و Ekinci ارائه شدند و مدل ۲ اصلاح شده مدل Haung می باشد که با تغییرهای دمایی به دست آمده است و مدل های ۳، ۵، ۶ و ۷ در این مطالعه به دست آمدند. مدل ۵ و ۶ عملکرد دما و رطوبت مواد و  $CO_2$  تولیدی در فرآیند کمپوست را نشان می دهد و مدل ۷ اثر دما و میزان هوادهی توده کمپوست را نشان می دهد.

جدول ۳- مدل های به کار برده شده در مطالعه

شماره مدل	مدل سینتیکی
۱	$K_T = K_{20} \cdot a^{(T-20)}$
۲	$K_T = K_{23} \cdot a^{(T-23)}$
۳	$K_T = a \cdot \exp\left[\left(b \cdot T\right) + \left(c \cdot \frac{M_c}{T}\right)\right]$
۴	$K_T = a \cdot \exp\left[b \cdot \left(\frac{M_i - c}{d}\right) + \left(\frac{T - f}{g}\right)\right]$
۵	$K_T = \frac{a}{T - \frac{M_c}{C \cdot b}} \cdot \exp\left[\left(T \cdot c\right) - \left(d \cdot \frac{M_c}{T}\right)\right]$
۶	$K_T = a \cdot b^c \cdot \exp\left[\left(c \cdot T\right) - \left(d \cdot \frac{M_c}{T}\right)\right]$
۷	$K_T = e^{(V_h - a)} \cdot K_{23} \cdot b^{(T-23)}$

آنالیز مدل های سینتیکی با آنالیزهای آماری خطای مربعات میانگین ریشه ها (RMSE)،  $\chi^2$  و کارآمدی مدل سازی modeling efficiency (EF) آنالیز شدند. این آنالیزهای آماری با استفاده از معادله های زیر انجام شدند:

(۳)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_{pre,i} - K_{exr,i})^2}{N}}$$

(۴)

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (K_{pre,i} - K_{exr,i})^2}{N - n}$$

(۵)

است. چهار الگوی هوادهی در راکتورها مورد آزمایش قرار گرفت که این الگوها در جدول شماره ۲ آورده شده اند.

جدول ۲- سرعت هوادهی در راکتورهای مختلف

شماره راکتور	سرعت هوادهی
۱	0.1 air min <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> om
۲	0.2 air min <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> om
۳	0.4 air min <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> om
۴	0.8 air min <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> om
شاهد	هوادهی طبیعی

راکتورهای ساخته شده از جنس آهن گالوانیزه بودند و با استفاده از پشم شیشه به ضخامت ۱۰ میلی متر عایق کاری شدند. این راکتورها در حجم ۶۰ لیتر (۵۰×۶۰×۲۰) سانتی - متر بودند که هر راکتور به سه بخش تقسیم شده است.

فرآیند کمپوست سازی به مدت ۲۱ روز انجام شده است و پارامترهای مورد مطالعه در طول فرآیند اندازه گیری شدند. دمای حاصل از متابولیسم میکروبی ایجاد شده مهم ترین فاکتور مورد مطالعه بود که با استفاده از دماسنج نصب شده در وسط هر راکتور هر ۳۰ دقیقه یکبار ثبت می شد. دی اکسید کربن تولیدی توسط یک دستگاه آنالیزر  $CO_2$  هر یک ساعت یکبار اندازه گیری و ثبت می شد. مواد آلی، pH و رطوبت توده به صورت روزانه پایش می شدند. میزان رطوبت به عنوان یک فاکتور مهم در فرآیند کمپوست است که موجب حل شدن نوترینت های مورد نیاز میکروارگانیسم ها می شود و با استفاده از روش خشک کردن در دمای  $105^{\circ}C$  به صورت روزانه اندازه گیری می شد. مواد آلی موجود در توده کمپوست با سوزاندن در آون در دمای  $550^{\circ}C$  به مدت ۴ ساعت اندازه گیری شد. نرخ تجزیه مواد آلی با محاسبه میزان جامدات فرار در ابتدا و انتهای فرآیند و با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد

$$K = \frac{[OM_m(\%) - OM_p(\%)]}{OM_m(\%) \cdot [100 - OM_p(\%)]} \quad (1)$$

در این معادله:

OM<sub>m</sub>: میزان مواد آلی در ابتدای فرآیند

OM<sub>p</sub>: مواد آلی در انتهای فرآیند

### مطالعه سینتیک فرآیند کمپوست سازی

به منظور تعیین قابلیت تجزیه بیولوژیکی زائده های و تولید کود مفید لازم است سینتیک فرآیند با استفاده از داده های به دست آمده از آزمایش ها در شرایط کنترل شده مورد مطالعه قرار

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^N (K_{pre,i} - K_{exr,mean})^2 - \sum_{i=1}^N (K_{pre,i} - K_{exr,i})^2}{\sum_{i=1}^N (K_{pre,i} - K_{exr,mean})^2}$$

در این معادله‌ها:

$K_{exp}$ : سرعت تجزیه آزمایشگاهی مواد (g om/g om day)

$K_{exp, mean}$ : میانگین سرعت تجزیه آزمایشگاهی مواد (g om/g om day)

$K_{pre}$ : میزان تجزیه پیش‌بینی شده آزمایشگاهی مواد (g om/g om day)

$N$ : تعداد آزمایش‌ها

$n$ : تعداد ثابت‌های واکنش

در آنالیز آماری (RMSE) مقدار محاسبه شده نشان دهنده انحراف بین مقادیر محاسبه شده و آزمایش می‌باشد و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد انحراف کم‌تری وجود دارد.

$\chi^2$  نشان دهنده میانگین مربعات انحراف معیار بین مقادیر محاسبه شده و آزمایش شده می‌باشد. و برای انطباق مدل‌های سینتیکی به کار برده شده است. هر چه این مقدار کم‌تر باشد با مدل مطابقت بیش‌تری دارد.

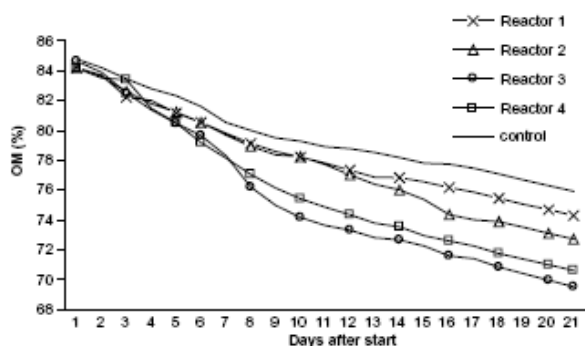
EF نیز برای آنالیز میزان کارآمدی مدل را نشان می‌دهد و حداکثر مقدار آن ۱ می‌باشد و هر چه مقادیر به ۱ نزدیک‌تر شود میزان انطباق مدل بیش‌تر است.

## یافته‌ها

تغییرهای دمایی تمامی راکتورها در سرعت‌های هوادهی مختلف در نمودار شماره ۱ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد در فرآیند کمپوست‌سازی در راکتور سوم بعد از ۶ روز دمای توده کمپوست به  $50^{\circ}\text{C}$  می‌رسد و در راکتور چهارم بعد از سه روز به  $42^{\circ}\text{C}$  می‌رسد نتایج تغییرهای دما در طی فرآیند در نمودار شماره ۱ آورده شده است. راکتور اول و دوم دمای کم‌تری نسبت به سایر راکتورها داشتند و راکتور شاهد دارای کم‌ترین دما نسبت با چهار راکتور هوادهی شده داشت. بعد از گذشت حدود ۱۲ روز دمای تمامی راکتورها اختلاف معنی‌داری به هم ندارند و به دمای ثابت می‌رسد.

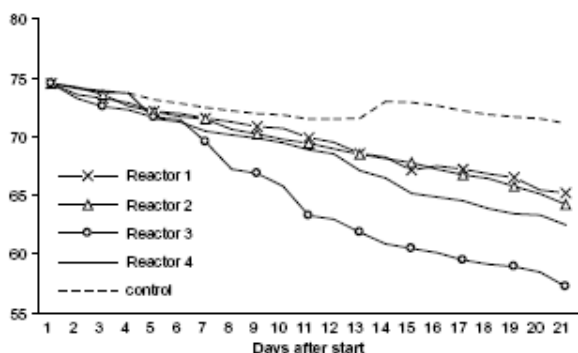
تفاوت معنی‌داری بین مقادیر pH و N در کمپوست حاصله از راکتورهای مختلف دیده نشده است ولی تفاوت معنی‌داری بین OM، MC،  $OM_{loss}$  وجود داشته است. گرادیان کاهش OM مرتبط با  $OM_{loss}$  است که ارتباط زیادی با میزان تنفس باکتریایی دارد.

نتایج در نمودار شماره ۲ نشان می‌دهد در تمامی راکتورها مواد آلی در طول دوره واکنش کاهش یافته است. مقادیر OM کاهش یافته در راکتورها بعد از ۲۱ روز به ترتیب ۴۹/۶، ۵۱/۰۷، ۵۸/۱۱، ۵۵/۹ و ۴۲/۳ برای راکتورهای ۱، ۲، ۳، ۴ و شاهد محاسبه شده است. حداکثر کاهش میزان مواد آلی و در نتیجه حداکثر قابلیت کاهش مواد آلی و در نتیجه قابلیت تجزیه بیولوژیکی در راکتور ۳ و ۴ دیده شده است.

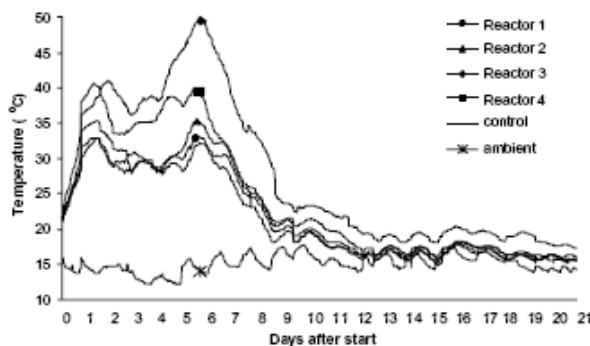


نمودار ۲- تغییرها مواد آلی کمپوست در راکتورها در طی فرآیند کمپوست‌سازی

میزان رطوبت در تمامی راکتورها در طول دوره کمپوست‌سازی کاهش می‌یابد. مکانیسم اصلی کاهش رطوبت در راکتورها در اثر تبخیر ایجاد شده است و کاهش دائمی مقدار رطوبت در توده کمپوست نشان دهنده تجزیه مواد آلی کمپوست است (۲، ۱۱). متوسط رطوبت مواد در توده کمپوست در ابتدای واکنش ۷۵٪ بوده است. حداکثر کاهش رطوبت در راکتور سوم دیده شده است و حداقل کاهش رطوبت در راکتور شاهد دیده شده است. این نتایج در نمودار شماره ۳ آورده شده است.



نمودار ۳- تغییرها رطوبت کمپوست در راکتورها در طی فرآیند کمپوست‌سازی



جدول ۴- نتایج آنالیز آماری مدل های سینتیکی واکنش

مدل	a	B	C	D	F	g	RMS E	$\chi^2$	EF
$= K_{20} \cdot a^{(T-20)}$	۰/۰۴۳۸۹	-	-	-	-	-	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰	۷۹
$K_{20} = K_{20} \cdot a^{(T-23)}$	۰/۰۷۸۱۲	-	-	-	-	-	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰	۷۶
$(T - (M - 1))$	۰/۰۰۰۰۱	۰/۱۲۴۷	۲۰۳	-	-	-	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰	۸۷
	۰/۰۱۹	۰	۱/۱	-	-	-	۰/۰۱	۰/۰۰۵	۰/
	۰/۰۹۳۸۸	۰/۰۹۹۷	۸۸۹	۰/۸۷	۰/۹۲	۰/۸	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰	۸۲
	۰	۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰۵	۰/۰۰۹	۰/
	۰/۰۱۲۰۶	۰/۰۹۸۸	۱۶۰	۰/۳۱	-	-	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۸۹
	۰	۰	۰/۰	۰/۰	-	-	۰/۰۵	۰/۰۰۵	۰/
	۰/۰۰۰۰	۰/۰۵۸۴	۲۱۷	۰/۳	-	-	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰	۷۳
	۰/۰۰۰۵	۰	۰/۰	۰/۰	-	-	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/
	۰/۰۱۶۱۶	۰/۰۱۹	-	-	-	-	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰	۷۴
	-	۰/۰۰۹	-	-	-	-	۰/۰۱	۰/۰۰۴	۰/

### بحث

در این مطالعه هوادهی در راکتورهای اول و دوم ناکافی صورت گرفته است و مواد کمپوست دمای پایینی دارند. ولی در راکتور سوم به دلیل این که سرعت تجزیه مواد زیادتر است و در نتیجه دمای توده بالاتر است. بنابراین نسبت هوا به مواد آلی مناسب برای تهیه کمپوست کردن زائده های کشاورزی ۰/۴۱ (هوا در دقیقه به ازای هر کیلوگرم مواد آلی) است. نتایج آنالیز آماری مورد استفاده برای ارزیابی مدل های سینتیکی نشان داد بیشترین مقادیر EF و کمترین مقادیر RMSE مربوط به مدل شماره ۵ است بنابراین این مدل به عنوان بهترین مدل سینتیکی انتخاب شده است.

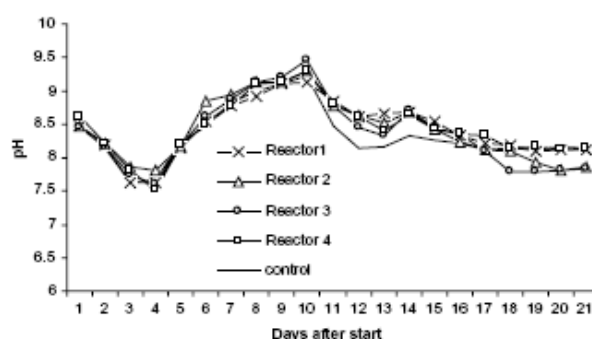
### نتیجه گیری

بر اساس نتایج به دست آمده ۰/۴۱ هوا در دقیقه به ازای هر کیلوگرم مواد آلی در فرآیند بیولوژیکی کمپوست سازی این زائده های کشاورزی می تواند مورد استفاده قرار گیرد. با استفاده از مدل به دست آمده (مدل شماره ۵) می توان طراحی فرآیندهای بیولوژیکی تولید کمپوست از زائده های آلی کشاورزی و به خصوص طراحی هوادهای مناسب فرآیند بیولوژیکی هوازی را با اطمینان بیش تری انجام داد.

### سپاسگزاری

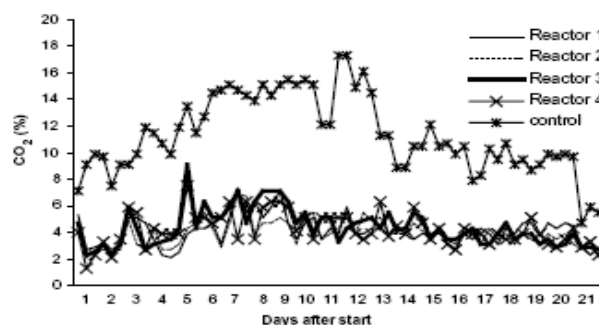
نویسندگان از دانشگاه آزاد خوی به خاطر همکاری در انجام پژوهش تشکر و قدردانی می نمایند.

تغییرهای pH در کمپوست نشان می دهد ابتدا از ۸/۵ به ۷/۵ کاهش می یابد و سپس تا ۹/۵ افزایش می یابد و در انتهای فرآیند به ۸-۸/۵ می رسد که الگوی عمومی فرآیند کمپوست سازی است. این تغییرها در تمامی راکتورها مشابه بوده است (نمودار ۴).



نمودار ۴- تغییرها pH کمپوست در راکتورها در طی فرآیند کمپوست سازی

CO<sub>2</sub> تولیدی در فرآیند کمپوست سازی ناشی از معدنی شدن مواد آلی است. مقدار گاز کربنیک تولیدی در تمامی راکتورها در طول فرآیند افزایش یافته است. مقدار CO<sub>2</sub> در راکتور شاهد بیشتر از سایر راکتورها بوده است به این دلیل که هوادهی کافی صورت نگرفته است و شرایط بی هوازی در راکتور اتفاق افتاده است. این نتایج در نمودار ۵ آورده شده است.



نمودار ۵- تغییرها گاز کربنیک تولیدی در راکتورها در طی فرآیند کمپوست سازی

نتایج آنالیز آماری مدل های سینتیکی در جدول شماره ۴ آورده شده است. آنالیز آماری نشان می دهد حداقل مقدار RMDE و حداکثر مقدار EF در مدل ۵ دیده شده است. هم چنین مقدار  $\chi^2$  در مدل ۷ کم تر از سایر مدل ها بوده است. با توجه به آنالیزهای آماری مدل ۷ در تمامی سرعت های هوادهی کاربردی تر است و بهترین مدل، مدل شماره ۵ است که در زیر آورده شده است:

$$K_T = \frac{a}{\tau \left( \frac{M_c}{C} \right)^n} \cdot \exp \left[ \left[ (T_c) - \left( d \cdot \frac{M_c}{\tau} \right) \right] \right]$$

## منابع

1. APHA (American Public Health Association), Standard methods for the examination of water and wastewater, APHA, Washington, DC 2005.
2. Bari QH, Koenig A. Effect of air recirculation and reuse on composting of organic solid waste. *Resources Conserve & Rec.* 2001. 33: 93–111.
3. Brodie HL, Carr LE, Condon P. A comparison of static pile and turned windrow methods for poultry litter compost production. *Compost Sci & Utilizes.* 2000. 8: 178–189.
4. Buchanan M, Gilessman SR. How compost fertilization affects soil nitrogen and crop yield. *Biocycle.* 1973. 32: 72–76.
5. Diaz MJ, Madejon E, Lopez F, Lopez R, Cabrera F. Optimization of the rate vinasse/grape marc for co-composting process. *Process Biochem.* 2002. 37: 1143–1150.
6. Ekinci K, Keener HM, Michael FC, Elwell DL. Effects of temperature and initial moisture content on the composting rate of short paper fiber and broiler litter, ASAE Annual Meeting, California 2001.
7. Garcia C, Hernandez T, Costa F. Composted vs. uncomposted organics. *Biocycle.* 2009. 33: 70–72.
8. Golueke CG. *Composting—A Study of the Process and its Principles.* Rodale Press, Emmaus, PA 2007.
9. Hamoda MF, Qdais HAA, Newham J. Evaluation of municipal solid waste composting. *Resource. Conserve Recycle.* 1998. 23: 209–223.
10. Haung RT. *The Practical Handbook of Compost Engineering.* Lewis Publishers, Boca Raton, FL 1993.
11. Keener HM, Elwell DL, Ekinci K, Hoitink HAJ. Composting and value-added utilizasyon of manure from a highrise swine finishing facility. *Compost Sci & Utilizes.* 2001. 9 (4): 312–321.
12. Liang C, Das KC, McClendon RW. The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. *Bioresour. Technol.* 2003. 86: 131–137.
13. Miller FC, Finstein MS, Materials balance in the composting of wastewater sludge as affected by process control. *J. Wat. Pollut. Contr. Fed.* 2009. 57: 122–127.
14. Negro MJ, Solano PC, Carrasco J, Composting of sweet sorghum bagasse with other wastes. *Bioresour. Technol.* 2008. 67: 89–92.
15. Pos J. *Composting—theoretical applications, municipal and commercial composting workshop,* University of Guelph 2004.
16. Schlegel AJ. Effect of composted manure on soil chemical properties and nitrogen use by gain sorghum. *J. Prod. Agric.* 1992. 5: 153–157.
17. Vining MA. *Bench-Scale Compost Reactors System and the Self Heating Capabilities.* Master of Science thesis, Texas A & M University Department of Civil and Environmental Engineering 2002.
18. Wiley JS, Pierce GW. A preliminary study of high rate composting. In: *Proc. Am. Soc. Civil Engineering,* paper no: 846.81, 1995, pp. 1–28.
19. Wilson GB, Dalmat D. Measuring compost stability. *Biocycle.* 1973. 27: 34–37.



## کمپوست سازی بیولوژیکی از برخی زائده های آلی کشاورزی و بررسی مدل های سینتیکی میکروارگانیسم ها

فتح اله غلامی بروجنی<sup>۱</sup>، فاطمه نجات زاده<sup>۲\*</sup>

۱. گروه بهداشت محیط، مرکز تحقیقات علوم بهداشتی، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ایران

۲. گروه کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوی، خوی، ایران

### چکیده

**سابقه و هدف:** هدف از انجام این مطالعه تعیین سرعت هوادهی و سینتیک های واکنش آن در کمپوست هوازی برخی از زائده های کشاورزی می باشد.

**مواد و روش ها:** در این مطالعه به منظور ایجاد سرعت های هوادهی مختلف از چهار راکتور با هوادهی مکانیکی و یک راکتور با هوادهی طبیعی استفاده شده است. میزان تغییرهای غلظت دی اکسید کربن و دما در سه نقطه از راکتور پایش شده است. میزان رطوبت، pH و میزان مواد آلی به صورت روزانه پایش شد. متغیرهای کنترل کننده فرآیند (CO<sub>2</sub>، دما، pH و میزان رطوبت) به عنوان عوامل مداخله کننده در فرآیند و تجزیه بیولوژیکی مواد آلی به عنوان پارامتر بررسی راندمان فرآیند به کار گرفته شده اند. در این مطالعه هفت مدل سینتیکی مختلف به منظور مدل سازی سرعت تجزیه بیولوژیکی مواد آلی مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه مواد با مخلوط چمن و زائده های گوجه فرنگی، سیب زمینی و هم چنین بادمجان به کار رفته است.

**یافته ها:** بر اساس نتایج به دست آمده چهار مدل سینتیکی از این مدل ها در این مطالعه کاربرد داشتند. این مدل ها با آنالیزهای آماری خطای مربعات میانگین ریشه ها (RMSE)، chi-square ( $\lambda^2$ ) و کارآمدی مدل سازی modeling efficiency (EF) آنالیز شدند. بر اساس آنالیزهای آماری این مدل ها، بهترین مدل انتخاب شده مدل زیر بوده است:

$$K_T = \frac{a}{T - (C.b)} \cdot \exp\left[\left(T.c\right) - \left(d \cdot \frac{M_c}{T}\right)\right]$$

که در این مدل  $K_T$  سرعت تجزیه (gVS/gVS day)،  $T$  دمای فرآیند ( $^{\circ}C$ )،  $M_c$  میزان رطوبت روزانه (%Wb)،  $C$  میزان روزانه دی اکسید کربن در راکتور (/) و  $a$ ،  $b$ ،  $c$  و  $d$  ثابت های واکنش می باشند.

**بحث:** بر اساس نتایج به دست آمده از این مطالعه، حداکثر تجزیه بیولوژیکی مواد آلی و میزان دما در نسبت هوادهی ۰/۴۱ هوا در دقیقه به ازای هر کیلوگرم مواد آلی به دست آمده است.

**نتیجه گیری:** بنابراین، این مقدار هوا در فرآیند بیولوژیکی کمپوست سازی این زائده های کشاورزی می تواند مورد استفاده قرار گیرد.

**واژه های کلیدی:** کمپوست، زائده های کشاورزی، سرعت هوادهی، سینتیک، میکرو ارگانیسم

### مقدمه

مقدار زائده های تولیدی جهان روز به روز به موازات افزایش جمعیت رو به افزایش است. زائده های آلی مواد زائد جامد نقش مهمی در آلودگی محیط زیست دارند. فرآیندهای دفن در زمین، سوزاندن، پیرولیز، بیوگاز و کمپوست کردن از جمله روش های دفع زائده های آلی است. روش های کمپوست

### نویسنده مسئول:

گروه کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوی، خوی، ایران

پست الکترونیکی: [fnejatzadeh@yahoo.com](mailto:fnejatzadeh@yahoo.com)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۵/۱

