

حل عددی فرآیند تولید و انتقال حرارت در کمپوست پشته‌ای با استفاده از روش المان محدود

آیدین غفارنژاد مهربانی^۱، مهدی تاجداری^۲، مریم شیرازی^۳

دانشگاه صنعت آب و برق^۱

aidinmehraban@yahoo.com

دانشگاه آزاد اسلامی واحد دامغان^۲

دانشگاه تبریز^۳

چکیده

یکی از راه‌های مبارزه با زباله‌ها تبدیل آنها به کمپوست است. با توجه به اهمیت اجرای صحیح پروسه کمپوست، مطالعه تغییر و تحولات حین پروسه ضروری است. یکی از مهمترین عوامل تاثیر گذار بر کیفیت و سرعت کمپوست، تولید و انتقال حرارت در داخل آن است که این دو عامل ارتباط مستقیم با یکدیگر دارند. در این مقاله تولید و انتقال حرارت در داخل سیستم کمپوست پشته‌ای با استفاده از حل مدل‌های موجود توسط روش المان محدود در چهار عمق مختلف پشته محاسبه گردیده است. مقایسه نتایج حل عددی با اندازه‌گیری‌های تجربی، نشان دهنده حداکثر خطای ۱۸٪ و حداکثر میانگین مربعات خطای ۱۱.۳ است.

واژه‌های کلیدی

المان محدود، تولید حرارت، کمپوست

۱. مقدمه

امروزه تولید زباله یکی از معضلاتی است که جوامع بشری را با مشکلات مواجه کرده است. سالانه میلیون‌ها تن زباله آلی در جهان تولید می‌شود که به دلیل آنکه مکان مناسبی برای رشد انواع میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا می‌باشند بسیار مشکل‌آفرین‌اند. تجزیه این مواد نیز با بوی بد همراه بوده و تولید گازهای سمی می‌نماید. با توجه به این مشکلات، راه‌های مختلفی برای حذف و یا دفع این نوع زباله‌ها پیشنهاد گردیده است. مهمترین روشی که امروزه برای این منظور استفاده می‌شود کمپوست کردن این مواد است. منظور از کمپوست کردن فرآیندی است هوایی که در طی آن میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده در داخل زباله رشد می‌نمایند. این میکروارگانیسم‌ها مواد آلی قابل تجزیه را تجزیه می‌نمایند. این فرآیند گرم‌زاست و باعث بالا رفتن دمای محیط کمپوست می‌شود. با بالا رفتن دما، غالب میکروارگانیسم‌های مضر از بین می‌روند. با ادامه فرآیند و پایان یافتن مواد غذایی فرآیند متوقف می‌شود. محصول به دست آمده، توده‌ای است سرشار از مواد آلی ریز مولکول که می‌توانند به راحتی جذب گیاه شوند. همچنین بخش قابل توجهی از این توده را نیز میکروارگانیسم‌های غیر مضر تشکیل می‌دهند که در بهبود کیفیت خاک مفید می‌باشند. لذا محصول به دست آمده می‌تواند به عنوان یک کود آلی بسیار مناسب استفاده گردد.

از میان روش‌های مختلفی که برای تولید کمپوست وجود دارد، روش پشته‌ای^۱ به دلیل سادگی و هزینه تولید پایین، اهمیت بسیاری دارد و در حال حاضر به طور گسترده در تولید انواع کمپوست مورد استفاده قرار می‌گیرد. حتی در مراکزی که به تجهیزات پیشرفته تولید کمپوست مخزنی مجهز هستند، به دلیل کاهش هزینه‌ها ترجیح داده می‌شود پروسه تولید به صورت ترکیبی از روش مخزنی و پشته‌ای باشد. به این صورت که مراحل اولیه تولید تا شروع فرآیند در مخزن انجام می‌گیرد و ادامه مراحل تا تولید کمپوست کامل در پشته‌ها کامل می‌گردد.

^۱ Microorganisms

^۲ windrow

در کمپوست کردن به شیوه پشته ای ، مواد اولیه پس از خرد شدن ، به رطوبت مناسب (معمولاً بین ۴۰ تا ۶۰٪) رسانده شده و سپس به صورت پشته در می آیند . این پشته ها که به صورت نواری آرایش یافته اند معمولاً دارای ارتفاع حدود ۱.۵ تا ۳ متر ، عرض ۲ تا ۴ متر و طول ۳۰ تا ۴۰ متر می باشند . مقطع عرضی این نوارها به صورت نیم بیضی یا نیم دایره است .

در این پشته ها جریان هوای اجباری وجود ندارد . پس از شروع فرآیند رطوبت افزوده نمی شود. معمولاً انتقال حرارت سطح بیرونی با هوای اطراف به صورت آزاد انجام می گیرد .

جهت بهبود پروسه تولید و یکنواخت تر نمودن محصول تولیدی ، می توان پشته ها را در فواصل زمانی معینی زیر و رو کرد تا با آمیخته شدن لایه های درونی که شرایط بهتری از نظر دما و رطوبت را تجربه کرده اند با لایه های بیرونی که سرعت رشد کند تری داشته اند ، امکان ادامه پروسه برای تمامی مواد فراهم گردد .

با توجه به حجم بالای زباله تولید شده ، سرعت در انجام فرآیند کمپوست و نیز کیفیت محصول تولیدی بسیار حائز اهمیت است . جهت دست یافتن به محصول مناسب می بایست پارامترهای تاثیر گذار بر فرآیند به طور کامل شناسایی گردیده و کنترل شوند .

طبق تحقیقات انجام شده ، فرآیند مذکور به عوامل دما ، رطوبت ، اکسیژن ، PH، اندازه ذرات و ... وابسته است . تلاش های فراوانی برای مطالعه میزان تاثیر هر یک از این عوامل بر فرآیند انجام شده است . [7, 8] در نتیجه این تحقیقات برخی مدل های ریاضی برای فرآیند ارائه شده است . [3, 11]

از سال ۱۹۷۶ که اولین مدل ریاضی برای کمپوست ارائه شد تاکنون مقالات متعددی در این زمینه به چاپ رسیده است [11] . اولین کاربرد روش المان محدود در بررسی و مدل سازی کمپوست در سال ۱۹۹۷ و برای بررسی قابلیت فشردگی توده های کمپوستی توسط داس و کینر بود . [5] باری نیز المان محدود را در مدل سازی کمپوست به کار برده است [2] .

از مدل های ریاضی مهمی که برای تفسیر پدیده کمپوست ارائه شده اند می توان به مدل های huag (که مبنای کار المان محدود باری بود) [8] ، keener، که بعدها توسط محققان دیگر گسترش یافته است [12] و vandergheynst اشاره کرد [13] .

مشکل عمده مدل های ارائه شده در این است که این مدل ها با مطالعه در مقیاس کوچک به دست آمده و برای حجم های کم و در حالتی که بتوان کل مجموعه شامل فرآیند را با خواص و شرایط واحد در نظر گرفت معتبر می باشد . برای حالت های واقعی استفاده از این مدل ها جواب صحیحی نمی دهد و نیاز است تا مدلی کلی تر ارائه گردد .

۲. مدل مسئله

برای مدل سازی تولید حرارت در کمپوست ، از مدل هونگ استفاده شده است . مدل هونگ در سال ۲۰۰۰ توسط هونگ ارائه شد. [10] . در مدل هونگ فرض بر این است که توده کمپوست شامل چهار جزء است :

قسمت اول ، مواد آلی با زنجیره کربن بزرگ هستند که قابل تبدیل به مواد ساده تر می باشند و تجزیه آنها انرژی زا است . این مواد را در اصطلاح مواد غذایی می نامند و با علامت S مشخص می کنند . این مواد شامل چربی ها ، پروتئین ها ، مواد سلولوزی و ... هستند . مواد غذایی می توانند به عنوان منبع تغذیه میکروارگانیسم ها در فرآیند وارد شده و تجزیه گردند . میکرو ارگانیسم های موجود در توده ، در طی فرآیند تولید مثل می کنند . نسبت وزنی میکروارگانیسمها به وزن توده با علامت X مشخص می شود . بخش مهمی از وزن توده مربوط به رطوبت موجود در آن می باشد . رطوبت توده کمپوستی ، تاثیر مشخصی بر کیفیت و کمیت رشد فرآیند در توده دارد .

با شروع فرآیند از میزان مواد غذایی کاسته می شود . سرعت تغییر در محتوای مواد غذایی توده به درصد مواد غذایی و میکروارگانیسم ها در توده وابسته است . رابطه ای که در مدل هونگ برای سرعت تغییرات مواد غذایی ارائه شده است ، مطابق رابطه (۱) می باشد .

$$\frac{dS}{dt} = -K'X \left(\frac{SX}{K_c X + S} \right) + Xk_d \quad (1)$$

با کاهش مواد غذایی و تولید کمپوست، مقدار توده زنده نیز افزایش می یابد . افزایش توده زنده نیز وابسته به درصد مواد غذایی و درصد توده زنده کمپوست است . از این فرمول (2) محاسبه است :

$$dX = \mu_m \left(\frac{SX}{K_c X + S} \right) - bX \quad (2)$$

مقادیر پارامترها برای مواد مختلف به صورت تجربی به دست می آید و در منابع موجود است . ضریب K' که به عنوان ضریب تاثیر عوامل محیطی در رابطه (۱) معرفی شده ، عوامل رطوبت ، دما ، فضای موجود ما بین ذرات و میزان اکسیژن را در جواب نهایی تاثیر می دهد (رابطه (۳)) .

$$K' = K_T K_{moisture} K_{FAS} K_{O_2} \quad (3)$$

که در آن در اثر K_T ضریب تصحیح دما، $K_{moisture}$ ضریب تصحیح رطوبت، K_{FAS} ضریب تصحیح فاصله بین ذرات و K_{O_2} مربوط به مقدار اکسیژن موجود در توده می باشد.

ضریب تصحیح دما: رشد میکرو ارگانیسم ها 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 سانتی گراد، می توان به بهترین شرایط دمایی برای این موجودات دست یافت. در دماهای بالاتر از ۷۰ فعالیت میکروارگانیسم ها 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 (۴) فرموله گردیده است:

$$K_T = \exp \left\{ \frac{-E_A}{R_A} \frac{1}{T + 273} - \frac{1}{333} \right\} \text{ for } T \leq 60^\circ C \quad (4a)$$

$$K_T = \frac{80 - T}{80 - 60} \text{ for } 60^\circ C \leq T \leq 80^\circ C \quad (4b)$$

$$K_T = 0 \text{ for } T \geq 80^\circ C \quad (4c)$$

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 میکروب هاست کمتر باشد، رشد توده زنده کمپوست متوقف خواهد شد. رطوبت های بالای ۸۰٪ نیز شرایط رشد را از میکروب ها سلب خواهد کرد. در این حالت رابطه (۵a) برقرار خواهد بود.

$$K_{moisture} = 0 \text{ for } w \leq w_a \text{ \& } w \geq 80\% \quad (5a)$$

برای محتوای رطوبت بالاتر از حد بحرانی در شرایطی که رطوبت کمتر از ۶۰٪ باشد، افزایش رطوبت باعث بهبود شرایط فرآیند خواهد شد و رابطه (۵b) برقرار خواهد بود:

$$K_{moisture} = \frac{w - w_a}{K_a + w} \text{ for } w_a \leq w \leq 60\% \quad (5b)$$

اگر رطوبت از ۶۰٪ بالاتر برود، تاثیر منفی بر سرعت رشد خواهد داشت و با کاهش فعالیت میکروبی خواهد شد. در این حالت ضریب تصحیح رطوبت از رابطه (۵c) قابل محاسبه است:

$$K_{moisture} = \frac{w - w_a}{K_a + w} \frac{80 - w}{20} \text{ for } 60\% \leq w \leq 80\% \quad (5c)$$

مقادیر W_a و K_a وابسته به نوع ماده توده کمپوست می باشد و برای مواد مختلف از طریق تجربی به دست می آید. **ضریب تصحیح فاصله بین ذرات:** فاصله خالی میان اجزا در فرآیند کمپوست به دلیل رابطه مستقیم آن با انتقال اکسیژن و گازهای تولیدی بسیار مهم و تاثیر گذار است. در مدل هونگ ضریب تصحیح فاصله میان ذرات از رابطه (۶) محاسبه می شود:

$$K_{FAS} = \frac{1}{1 + e^{[-23.675 \cdot FAS + 3.4945]}} \quad (6)$$

ξ_{FAS} فاصله بین ذرات است که به دلیل تلاشی مواد اولیه در طی فرآیند، مقدار دقیق آن با گذشت زمان کمتر می شود ولی به دلیل ناچیز بودن این تغییر در مقایسه با اثر تغییر دما و رطوبت، آن را در طی فرآیند ثابت در نظر می گیریم. مقدار عددی فاصله بین ذرات به صورت تجربی مشخص می شود. برای این تحقیق از مقادیر ارائه شده در منابع استفاده شد [4].

⁴ Free air space

ضریب تصحیح میزان اکسیژن : نفوذ اکسیژن به لایه های درونی توده که از طریق منافذ موجود در توده صورت می گیرد محدود است . مدل سازی دقیق نفوذ اکسیژن در لایه ها بسیار مشکل است . در مدل هونگ برای ضریب تصحیح اکسیژن رابطه (7) پیشنهاد شده است :

$$k_{O_2} = \left(\frac{Vol\%O_2}{K_0 + Vol\%O_2} \right) \quad (7)$$

$Vol\%O_2$ نشان دهنده درصد گاز اکسیژن در هوای ورودی است . اگر ذرات به خوبی با یکدیگر مخلوط شده باشند ، فاصله میان ذرات در نقاط مختلف توده تقریباً یکسان خواهد بود . K_0 ضریبی است که با در نظر داشتن سرعت ورود و خروج اکسیژن و میزان اکسیژن هوا محاسبه می شود . اندازه ذرات نیز در این ضریب تاثیر گذار است . با توجه به نوع مواد مورد استفاده در آزمایش با توجه به منابع ضریب K_0 برابر ۰.۰۶۶ انتخاب گردیده است [4].

۳. بقای جرم

در فاصله زمانی بین $t-1$ تا t ، جرم اجزای توده دچار تغییر می شود. در هر بازه زمانی با استفاده از معادلات ارائه شده می توان سرعت تغییرات مواد غذایی و میکروارگانیسم ها را تعیین نمود . مقدار این مواد در هر زمان با استفاده از معادلات بقای جرم قابل محاسبه است . در مورد رطوبت موجود نیز با استفاده از معادلات بخش بعد ، این توضیحات صادق است . برای اجزای توده می توان نوشت [3]:

$$\frac{dM(S)}{dt} = M(S_{t-1}) - M(S_t) \quad (8a)$$

$$\frac{dM(X)}{dt} = M(X_{t-1}) - M(X_t) \quad (8b)$$

$$\frac{dM(W)}{dt} = M(W_{t-1}) - M(W_t) \quad (8c)$$

۳-۱. تعادل رطوبت در توده

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

$$\frac{dW}{dt} = - \lambda j \frac{W}{M} \quad \text{that} \quad j = \frac{18}{22.4} \frac{P_2}{p_0 - P_2} \quad (9)$$

رابطه میان فشار هوا و فشار بخار اشباع را می توان از رابطه زیر به دست آورد :

$$\frac{P_2}{P_0} = \exp \left(A - \frac{B}{T + D} \right) \quad (10)$$

در این رابطه A, B و D از طریق تجربی به دست می آیند که مقدار آنها برابر است با $A=11.961$, $B= 3993.7$, $D= 233.9$ [3].

۴. بقای انرژی

توده کمپوستی را می توان به عنوان یک سیستم انرژی تحلیل کرد . برای هر سیستم تفاوت انرژی ورودی و خروجی سیستم با تغییر در انرژی درونی سیستم برابر است . از آنجایی که سیستم پشته ای را در جهت طولی می توان یکنواخت فرض کرد ، لذا سیستم انرژی را می توان در صفحه عمود بر جهت گسترش پشته بررسی نمود . برای سیستم در صفحه می توان نوشت [9]:

$$- \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (11)$$

تولید انرژی در توده در اثر فعالیت های هوازی میکروبی صورت می گیرد . انتقال حرارت در توده کمپوست هم از طریق جابجایی توسط جریان هوا در داخل پوسته و هم از طریق هدایت صورت می گیرد . جریان هوا، از طریق منافذ موجود در کناره های لایه زیرین توده وارد می شود. برای این منظور در بستر پشته لایه ای از ضایعات چوب برای ایجاد بستری متخلخل قرار داده شده است . هوا از این منافذ وارد شده و با افزایش دما در داخل توده ، حرکت گازها رو به بالا هدایت می شود . ترکیب هوای خروجی با هوای ورودی متفاوت است . اکسیژن موجود در هوای ورودی در داخل توده به مصرف باکتری های هوازی رسیده و در طی فرآیند به دی اکسید کربن تبدیل می شود . در اثر تبخیر رطوبت توده ، درصد بخار آب در گازهای خروجی از

هوای ورودی بیشتر است. در اثر فعالیت های میکروبی مقادیری اکسیدهای نیتروژن و گوگرد نیز در هوای خروجی وجود دارد. در معادلات مربوط به ترکیب هوا، تنها تغییر مقدار بخار آب مد نظر قرار گرفته و از تاثیر تغییرات اکسیژن و دی اکسید کربن در انتقال حرارت چشم پوشی شده است.

در بررسی انتقال حرارت در توده، حرکت گازها در داخل حجم در کل رو به بالا در نظر گرفته می شود. این فرض با توجه به جهت ورود افقی گازها با خطا همراه است ولی نتایج به دست آمده حاکی از آن است که نتایج به دست آمده با این فرض در عین سادگی عملیات، قابل قبولند. از انتقال حرارت با زمین نیز چشم پوشی می شود.

با فرض جهت حرکت عمودی گازها، انتقال حرارت جابجایی مختص جهت عمودی خواهد بود و خواهیم داشت:

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{and} \quad q_y = -k \frac{\partial T}{\partial x} - h(T_{gas} - T) \quad (12)$$

شرایط مرزی توده به فرض انتقال حرارت جابجایی در سطح به دست می آید. در هر نقطه از سطح، روابط زیر برقرارند:

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y}\right) = h(T_s - T) \quad (13)$$

دمای محیط، تغییرات شبانه روزی و سالیانه دارد. وارد نمودن نوسانات دمای محیط در حل معادلات، حجم محاسبات را بسیار افزایش می دهد. لذا برای دمای محیط روندی خطی از متوسط روز اول تا روز پایان در نظر گرفته شده است.

مقادیر \dot{q} در هر نقطه، که برابر با انرژی تولیدی فعالیت های میکروبی است با تغییرات مقدار مواد آلی و میکروارگانیزم های توده در ارتباط است. انرژی تبخیر آب از دست رفته نیز در این قسمت وارد می شود.

معادله مربوط به تولید انرژی در واحد حجم توده چنین است: [3]

$$\dot{E} = -\dot{q} = -h_1 \left(\frac{dS}{dt} + \frac{dX}{dt}\right) + h_2 \frac{dW}{dt} \quad (14)$$

در رابطه ارائه شده در منبع برای تولید انرژی، ترم های مربوط به انتقال حرارت جابجایی از دیواره ها و انتقال حرارت جابجایی نیز در نظر گرفته شده است. در این مقاله به دلیل آنکه سیستم به صورت المان های مجزا در نظر گرفته شده است، تنها تولید حرارت خالص منظور گردیده و روابط انتقال حرارت به صورت جداگانه بررسی شده اند.

۵. روش المان محدود

معادلات المان محدود معادله ۱۱ را با شرایط مرزی ۱۳ می توان با استفاده از روش باقی مانده وزنی به دست آورد.

معادلات دمایی را می توان به صورت زیر نوشت [6]:

$$T(x, y, t) = [N(x, y)]\{T(t)\} \quad (15)$$

که در آن $[N]$ ماتریس درون یابی توابع المان ها و $\{T\}$ نشان دهنده دمای نود ها است. بردار گرادینان دما را می توان به

صورت زیر نوشت:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \end{pmatrix} = [B(x, y)]\{T(t)\} \quad (16)$$

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

$$[C]\{\dot{T}\} + [[K_c] + [K_h] + [K_{hs}]]\{T\} = \{Q_c\} + \{Q_Q\} + \{Q_q\} + \{Q_h\} \quad (17)$$

که ماتریس های داده شده با انتگرال گیری در روی سطح و یا روی محیط به صورت زیر به دست می آیند:

$$[C] = \int_A \rho c [N] [N] dA \quad (18a)$$

$$[K_c] = \int_A [B]^T k [B] dA \quad (18b)$$

$$[K_h] = \int_A [N]^T h [N] dA \quad (18c)$$

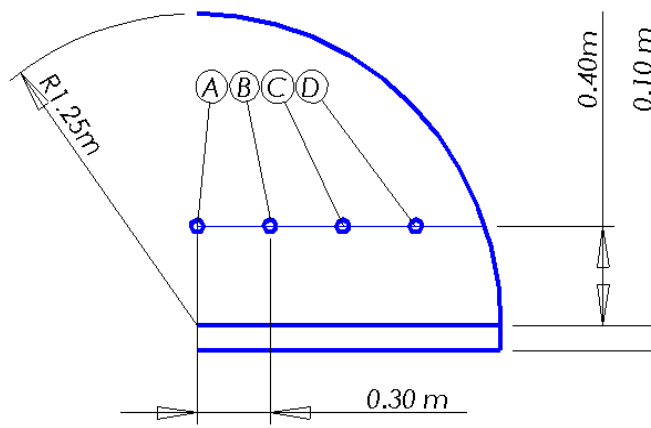
$$[K_{hs}] = \int_S h \{N\} \{N\} ds \quad (18d)$$

$$[Q_c] = - \int_S (\vec{q} \cdot \hat{n}) \{N\} ds \quad (18e)$$

$$[Q_Q] = - \int_A Q \{N\} dA \quad (18f)$$

$$[Q_q] = - \int_S q_s \{N\} ds \quad (18i)$$

$$[Q_h] = - \int_S h T_s \{N\} ds \quad (18j)$$



شکل ۱ - شکل شماتیک برش نیم برش عرضی پشته کمپوست به همراه جانمایی نقاط داده برداری

که در آن $[C]$ ماتریس ظرفیت گرمایی، $[K_c]$ ماتریس رسانش، $[K_h]$ ماتریس جابجایی، $[K_{hs}]$ ماتریس جابجایی سطحی، Q_c بردار بار رسانش، \vec{q} بردار انتقال گرمای جابجایی، \hat{n} بردار یکه نرمال در سطح، Q_Q بردار بار معادل تولید حرارت داخلی، Q_q بردار بار گرمایش سطحی، Q_h بردار بار معادل جابجایی سطحی است.

۶. داده برداری عملی

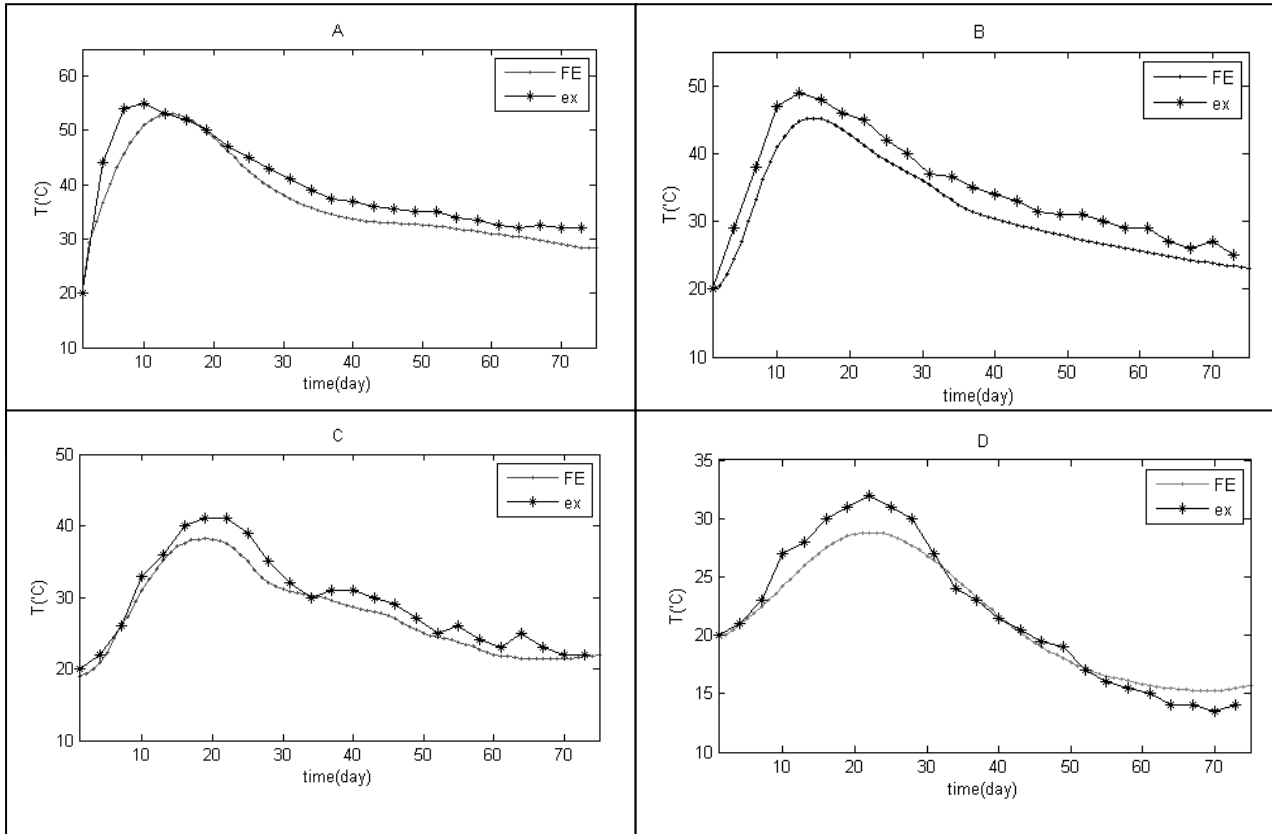
برای این پروژه، مواد اولیه انتخاب شده، فضولات گاو گوشتی بود که محتوای رطوبت آن در شروع کار به ۵۰٪ رسانده شد. پشته مورد نظر بر روی سطحی از ضایعات گیاهی درشت و تکه های چوب به ضخامت ۱۰ سانتی متر جهت ایجاد بستر متخلخل برای نفوذ بهتر هوا ایجاد شد. مقطع عرضی پشته به صورت نیم دایره ای با قطر ۲.۵ متر در نظر گرفته شد. البته ایجاد مقطعی به شکل نیم دایره از توده فضولات چندان ساده نیست و شکل نهایی با تقریب به شکل نیم دایره در نظر گرفته شد. برای جلوگیری از نفوذ بارندگی به درون پشته و تغییر در رطوبت مواد، از یک چادر پلاستیکی بر روی توده استفاده شد که البته برای ایجاد جریان مناسب هوا، فاصله ۱۵ سانتی متر بین سطح پشته و چادر در نظر گرفته شد.

نقاطی که دمای آنها اندازه گیری شد بر روی خط افقی به فاصله ۵ متر از سطح زمین و ۰.۴ متر از سطح پایینی پشته در نظر گرفته شدند. (شکل ۱)

برای اندازه گیری دمای توده، با توجه به دقت نه چندان بالای مورد نیاز برای اندازه گیری از یک دماسنج ساده جیوه ای استفاده شد. اطلاعات دما برای ۴ نقطه از عمق توده در فاصله زمانی ۳ روز ثبت گردید.

۷. محاسبات و نتایج

برنامه محاسبات المان محدود در محیط متلب آماده گردید . با استفاده از داده های موجود ، برنامه برای ۷۵ روز با فاصله زمانی یک روز حل شد . ترکیب اولیه مواد ، بر اساس منابع [3] ، ۵۰٪ آب ، ۴۰٪ مواد آلی تجزیه پذیر ، ۱٪ میکروارگانیزم ها و توده زنده و ۹٪ مواد غیر دخیل در فرآیند در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از محاسبات در شکل های 2-dتا2-a با هم مقایسه شده اند . برای تحلیل خطا، از پارامترهای ماکزیمم خطا ، ماکزیمم درصد خطا و میانگین مربع خطاها استفاده می کنیم . نتایج محاسبه این پارامترها در جدول ۱ آمده است.



شکل ۲- نمودار مقایسه ای دما- زمان برای نتایج عددی و تجربی چهار نقطه آزمون

نقطه	ماکزیمم اختلاف	ماکزیمم درصد خطا	میانگین مربع خطا
A	-8.30	18%	10.8
B	-6.10	14.9%	11.3
C	4	11.5%	4.1
D	3.20	11.5%	2.4

جدول ۱- پارامترهای مقایسه خطا محاسبه شده برای داده های چهار نقطه آزمون

با توجه به جدول می بینیم که تقریباً هر سه پارامتر ، جواب های دقیق تر را برای نقاط بیرونی تر گزارش می کنند . نقطه A دارای بیشترین قدرمطلق ماکزیمم خطا است . میانگین مربع خطاها نیز در این نقطه نسبت به نقاط بیرونی تر ، نشان دهنده اختلاف نسبتاً بالا در این نقطه است . این نتایج بر خلاف پیش بینی است . چرا که با توجه به دخالت بیشتر دمای محیط در نقاط بیرونی ، انتظار می رود اختلاف داده های تجربی و حل عددی در این نقاط بیشتر باشد . با مطالعه چهار نمودار به دست آمده (شکل ۲) واضح است که به طور کلی دمای پیش بینی شده از حل عددی از دمای اندازه گیری شده پایین تر است . مگر در لایه بیرونی که احتمالاً کاهش دمای اندازه گیری شده از نظر تجربی ، به دلیل تاثیر تغییرات دمای محیطی بوده است . پس به طور کلی می توان نتیجه گرفت که حل المان محدود

مدل هونگ برای توده کمپوست ، نتایج را کمی پایین تر از مقدار واقعی پیش بینی می کند . مقدار حدودی این اختلاف را می توان از نمودارهای A و B شکل ۲ به دست آورد . با توجه به اینکه در این دو نمودار ، خط مربوط به داده های تجربی در تمامی نقاط بالاتر از نمودار نتایج عددی قرار دارد ، پس جذر میانگین مربع خطا در این نقاط ، مقدار میانگین این خطا را مشخص می کند که برای نمودار A ، برابر ۳.۳ درجه سانتی گراد و برای نقطه B برابر ۳.۳۵ درجه سانتی گراد است .

در کل می توان نتیجه گرفت که در شرایطی که مقادیر به دست آمده برای پارامترهای جدول ۱ ، راضی کننده باشد می توان از حل عددی مدل هونگ برای تخمین دما در توده های کمپوستی استفاده نمود و برای اصلاح خروجی ، مقدار متوسط خطای ۳ درجه سانتی گراد را به نتایج به دست آمده اضافه نمود .

۸. مراجع

- [1] Agnew, J.M., Leonard, J.J., 2003. The physical properties of compost. *Compost Science & Utilisation* 11 (3), 238–264.
- [2] Bari, Q.H., Koenig, A., Guihe, T., 2000. Kinetic analysis of forced aeration composting. II. Application of multilayer analysis for the prediction of biological degradation. *Waste Management & Research* 18 (4), 313–319.
- [3] Beidou Xi , Zimin Wei , 2005, dynamic Simulation for Domestic Solid Waste Composting processes , *The Journal of American Science*, 1(1), 2005
- [4] c.che. the fuzzy model for composting . *waste management* . 2005
- [5] Das, K., Keener, H.M., 1997. Numerical model for the dynamic simulation of a large scale composting system. *Transactions of ASAE* 40 (4), 1179–1189.
- [6] Dechaumphai, 1994. Finite Element Method in Engineering. Chulalongkorn University Press Bangkok
- [7] Hammelers H.A Theoretical Model of Composting Kinetics. *Science and Engineering of Composting*. The Ohio State University. 93:37-58.
- [8] Haug, R.T., 1993. *The Practical Handbook of Compost Engineering*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA.
- [9] Holman, J.P., 1992. *Heat Transfer*. The McGraw-Hill, New York.
- [10] Huang JS, Wang CH, Jih CG. Empirical Model and Kinetic Behavior Thermophilic Composting of Vegetable Waste. *Journal of Environmental Engineering* 2000; 126(11):1019-25.
- [11] I.G. Mason, 2005, Mathematical modelling of the composting process: A review, *waste management*
- [12] Keener, H.M., Marugg, C., Hansen, R.C., Hoitink, H.A.J., 1993. Optimising the efficiency of the composting process. In: Hoitink, H.A.J., Keener, H.M. (Eds.), *Science and Engineering of Composting: Design, Environmental and Microbial and Utilisation Aspects*. Renaissance Publications, Worthington, USA, pp. 59–94.
- [13] VanderGheynst, J., Walker, L., Parlange, J., 1997. Energy transport in a high-solids aerobic degradation process: Mathematical modeling and analysis. *Biotechnology Progress* 13 (3), 238–248.

۹. ضمایم (جدول نمادها)

واحد	توضیح	علامت	واحد	توضیح	علامت
pa	فشار هوا	P_0	1/h	ثابت تلاشی درونی	B
pa	فشار بخار اشباع	P_s	j/mol	انرژی فعال سازی توده کمپوست	EA
M ³ /h	سرعت جریان هوا در توده	F	kg/Nm ³	محتوای بخار آب در حالت اشباع	J
j/mol ^o K	ثابت جهانی گاز	R		ضریب تاثیر شرایط محیطی	K'
kg/m ³	تمرکز مواد غذایی	S	kg/m ³	ثابت نیمه اشباع مقدار S وقتی که μ نصف μ_{max} است	Kc
h	دوره زمانی	T		ضریب تصحیح	Kd
°C	دمای توده	T		ضریب تصحیح فاصله ذرات	KFAS
°C	دمای محیط	T_s		ضریب تصحیح میزان اکسیژن	Ko ₂
°C	دمای گاز	T_{gas}		ضریب تصحیح دما	KT
	نسبت اشباع بخار	λ		ضریب تصحیح رطوبت	Kmoisture
1/h	سرعت مخصوص رشد	μ	Kg	جرم توده کمپوست	M
1/h	ماکزیمم سرعت مخصوص رشد	μ_{max}	Kg	جرم اجزای آلی قابل تجزیه	M(S)
	درصد کمپوست تولید شده	U	Kg	جرم آب در کل توده	M (W)
kg/m ³	تمرکز توده زنده	X	Kg	جرم میکروارگانیزم ها	M(X)