



Journal of Environmental Studies
Vol. 48, No. 3, Autumn 2022

Journal Homepage: www.Jes.ut.ac.ir
Print ISSN: 1025-8620 Online ISSN 2345-6922

Materials Balance of Municipal Solid Waste Composting System Using Recovery Factor Transfer Function (RFTF): A Case Study from Babol Composting Facility

Document Type
Research Paper

Received
June 30, 2020

Gholam Reza Nabi Bidhendi^{1*}, Omid Hasanzadeh Moghimi², Amir Nabi Bidhendi³, Maryam Rabiee Abyaneh²

Accepted
August 20, 2022

1 Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

2 Department of Environmental Engineering, Kish International Campus, University of Tehran, Kish, Iran.

3 Department of Environmental Engineering, Aras International Campus, University of Tehran, Jolfa, Iran.

DOI: 10.22059/JES.2021.282754.1007872

Abstract

Effectiveness of the separate collection system is the most important thing in the production of high-quality compost. The present work aims to analyze the mass balance of two separating machine components used in Babol composting facility (with capacity of 100 ton/day and 250 ton/day) based on recovery factor transfer function (RFTF) model to evaluate their efficiency. After sampling from the input and output of the processing line machines and quantitative and qualitative analysis of the waste, material balance was modeled based on RFTF. Calculations were performed for compost processing lines and a standard material balance diagram was prepared for both separation systems. Results showed that the new processing line of the Babol composting facility (with a capacity of 250 ton/day) has a more favorable performance compared to the old processing line (with a capacity of 100 ton/day). The new line reduced the amount of rejecting waste (refuse compost) by 19.84% compared to the old processing line. Also, by using this processing line, the amount of separated organic waste which will be later used in the fermentation and aeration phase of compost production was increased by 19.39%. In addition, the ratio of extracted materials with economic value was increased by 0.45%.

Keywords: Waste management, waste processing line, mass balance modeling, compost, Babol

* Corresponding Author:

Email: ghhendi@ut.ac.ir

Expanded Abstract

Introduction

The municipal solid waste composting line consists of three main phases: 1) separation, 2) aeration, and 3) final processing. The main purpose of the separation phase is isolating the compostable materials, i.e., organic materials, and reducing their size. Having high efficiency separating equipment is necessary for producing high quality compost. In this study, the mass balance of separating equipment used in Babol compost production plant was analyzed in order to evaluate its efficiency. Furthermore, the comparison of the acquired mass balance to the standard recovery factor transfer function (RFTF) model was conducted and corrective strategies to improve the efficiency of separating equipment was proposed.

Materials and methods

The Babol compost production plant was set up in 2000 with the initial capacity of 100 tons of mixed municipal waste per day. The production line consisted of an 8-meter trommel screen without magnet, a bag opener, and other mechanical separators. In 2018, the production line was renovated with the increased capacity of 250 tons per day to meet the new demands. More specifically, the new production line employs: 1) two 8-meter and 12-meter trommel screens, 2) one bag opener, 3) two magnets, 4) and a PLC control system.

Mass balance analysis, which is the direct application of law of conservation of mass, is the key to evaluating efficiency of processing systems. The results of such an analysis can be used to determine the proper capacity of separating units. RFTF can be shown by a diagonal matrix, where each diagonal element represents the percentage of a specific component in the waste stream after the processing. These components include ferrous metals, non-ferrous metals, glass, paper, plastics, residual organic materials (OR), and residual inorganic materials (IR).

In this study, to carry out our analysis, we compare the output of RFTF model with the mass balance of old and new (250 tons per day) processing lines. The physical analysis of input waste flow of RFTF is provided by the municipality of Babol. We took samples from input and output of processing line at multiple times for classification of component into the seven aforementioned groups.

Discussion of Results

Based on our physical analysis and the RFTF model calculations, the separation ratio of materials in the rotating circle of the old processing line with capacity of 100 tons of waste per day (12.5 tons per hour) is 52.78% under the sieve and 47.22% on sieve. Moreover, the 12-meter trommel screen of the processing line with capacity of 250 tons of waste per day (31.2 tons per hour) separates materials with the separation ratio of 50.82% on sieve and 49.18% under the sieve. These values for the 8-meter trommel screen with the input capacity of 15.87 tons of waste per hour are 52.96% on sieve and 47.04% under the sieve.

The separation ratios of materials in the waste processing unit of the old production line were 52.8% organic matter (i.e., composting capacity), 44.8% final residue (burial waste), and 2.4% of the material with economic value (extracted in the manual recycling stations). In comparison with the output of the RFTF model with the same input material ratio, separates 9.6% less organic materials which were buried in the landfill.

Also, the separation ratios of the material in the waste processing unit of the new production line are 72.19% organic matter (composting capacity), 24.96% final disposal (burial waste) and 2.85% materials of economic value (extracted in the manual recycling stations and by magnets). The new line separate 0.19% less organic matter, and 7.17% less materials with economic value compared with the output of RFTF model with the same input material ratio. Consequently, the percentage of final materials to be shipped to landfill for burial is 7.36% higher.

Conclusions

Our findings show that the new processing line of the composting plant of Babol (with a capacity of 250 tons per day) has an enhanced performance compared to the old processing line of this plant (with a capacity of 100 tons of waste per day). The new line reduced the amount of burial waste (the final residues of processing line) by 19.84% compared to the old processing line. Also, with the launch of a new processing line, the amount of organic matter developed for the production of compost, which will be later used in the fermentation and aeration phase, is increased by 19.39%. In addition, the ratio of extracted materials with economic value is increased by 0.45%. In spite of improved performance of the new processing line, there is huge gap between its performance and standard RFTF model output.

مدل‌سازی موازنه مواد در سیستم پردازش پسماندهای شهری با استفاده از تابع انتقال فاکتور بازیابی (RFTF) مطالعه موردی: کارخانه کمپوست بابل

غلامرضا نبی بیدهندی^{۱*}، امید حسن زاده مقیمی^۲، امیر نبی بیدهندی^۳، مریم ربیعی ایبانه^۲

۱ گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲ گروه مهندسی محیط‌زیست، پردیس بین‌المللی کیش، دانشگاه تهران، کیش، ایران
۳ گروه مهندسی محیط‌زیست، پردیس بین‌المللی ارس، دانشگاه تهران، جلفا، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۵/۲۹

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۹/۴/۱۰

چکیده

با توجه به اهمیت واحد پردازش در خط تولید صنعتی کمپوست، این پژوهش با هدف مدل‌سازی موازنه مواد در خطوط پردازش کارخانه تولید کمپوست بابل با ظرفیت ۱۰۰ و ۲۵۰ تن پذیرش پسماند مخلوط شهری در روز بر پایه تابع انتقال فاکتور بازیابی (RFTF) انجام گرفت. بدین منظور پس از برداشت میدانی از ورودی و خروجی دستگاه‌های خط پردازش کارخانه کمپوست بابل در مقاطع زمانی مختلف و آنالیز کمی و کیفی ترکیبات تشکیل دهنده پسماندهای تولیدی، مدل‌سازی موازنه مواد در سیستم پردازش پسماندهای شهری بر پایه RFTF صورت گرفت. محاسبات برای خطوط پردازش کمپوست انجام و دیاگرام موازنه مواد استاندارد برای خط پردازش در هر دو وضعیت تهیه شد. مطابق یافته‌ها، خط پردازش جدید کارخانه تولید کمپوست بابل دارای عملکردی مطلوبتر نسبت به خط پردازش قدیمی این کارخانه است؛ به نحوی که خط جدید توانسته میزان پسماندهای دفنی (ریجکتی نهایی خط پردازش) را به میزان ۱۹/۸۴ درصد نسبت به خط قدیمی کاهش دهد. همچنین راه‌اندازی خط پردازش جدید، میزان مواد آلی جداسازی شده که جهت تولید کمپوست به فاز تخمیر و هوادهی منتقل می‌شود را به میزان ۱۹/۳۹ درصد افزایش داده و نسبت مواد استحصال شده دارای ارزش اقتصادی را نیز به میزان ۰/۴۵ درصد بهبود بخشیده است.

کلیدواژه‌ها: مدیریت پسماند، سیستم پردازش، مدل‌سازی موازنه مواد، کمپوست، بابل.

سراغاز

از پسماندهای شهری در ایران، مشکلات محیط‌زیستی زیادی از قبیل تولید شیرابه و گازهای گلخانه‌ای، از بین بردن منابع تجدیدپذیر موجود در پسماندها و تخریب آب، خاک و هوا

در کشورهای در حال توسعه مانند ایران، عموماً قسمت اعظم ترکیبات مواد زاید جامد شهری را مواد آلی تشکیل می‌دهند (Shabanali Fami et al., 2021). دفن بخش زیادی

رایج‌ترین نقاله‌های مورد استفاده در صنعت کمپوست‌سازی هستند که مواد را با بازدهی بالایی به شیب‌های تند انتقال می‌دهند. این نقاله‌ها بخصوص در اتاق جداسازی دستی مواد بدلیل سهولت بالایشان در دسترسی به مواد، مورد استفاده قرار می‌گیرند (Pognani et al., 2010). کیسه بازکن، عموماً نخستین دستگاهی است که در ابتدای خط پردازش پسماند، جانمایی می‌گردد (Schievano et al., 2011).

جداسازهای مغناطیسی از یک تسمه نقاله یا محور استوانه‌ای با خاصیت مغناطیسی که بر روی نوار نقاله اصلی یا در انتهای آن قرار گرفته است، تشکیل شده‌اند. با عبور پسماندها روی نوار نقاله، اشیای فلزی آهنی به تسمه نقاله یا محور مغناطیسی می‌چسبند و از مابقی پسماندها جدا می‌گردند (Banks et al., 2011). محل نصب مگنت، تاثیر بسزایی در ارتقای کارایی و کیفیت آن دارد؛ بطور مثال، نصب این جداکننده در ابتدای خط پردازش، هنگامی که هنوز مواد اولیه، غیرهمگن می‌باشند، بدلیل وجود پلاستیک و دیگر اشیایی که روی اجسام فلزی قرار داشته و مانع جداسازی مطلوب فلزات می‌گردند، عمل نادرستی است (Edo-Alcón et al., 2016). سرند دوار یکی از متداول‌ترین انواع سرندهای چند منظوره برای پردازش پسماند می‌باشد. این وسیله شامل یک درام افقی چرخنده است که درون یک استوانه واقع شده و روی محور افقی می‌چرخد (Di Lonardo et al., 2012). تلفیق چرخش درام و اندکی شیب، مواد را به سمت انتهای سرند، هدایت می‌کند. در طول این مسیر، مواد کوچک که غالباً ترکیبات ارگانیک هستند از سوراخ‌های سرند، رد شده و بر روی تسمه نقاله‌ای که در زیر سرند قرار دارد می‌افتند و مواد بزرگتر، به انتهای سرند رسیده تا به وسیله تسمه نقاله به دیگر ماشین‌آلات جداسازی هدایت شوند. محور گردش سرند دوار، شیب اندکی دارد، به نحویکه پسماند از انتهای بالاتر وارد شده و در حین گردش سرند دوار در طول آن حرکت می‌کند (Hande and Deshpande, 2014).

درک کامل اجزای یک سیستم پردازش و طراحی موثر آن، مستلزم انجام محاسبات موازنه جرمی سیستم به گونه‌ای

را در پی داشته است (Hosseinizadeh et al., 2021). تولید کمپوست از مخلوط پسماندهای شهری با هدف کاهش حجم و وزن مواد دفنی، کاهش انتشار بو و شیرابه، بازیافت منابع و کاهش هزینه‌های احتمالی دفن، صورت می‌گیرد (Połomka and Jedrczak, 2020). با در نظر گرفتن تمام مسایل محیط‌زیستی و اقتصادی مربوط به مدیریت پسماند، به ویژه کاهش دفن پسماندها، تکنیک‌هایی کم‌هزینه مانند کمپوست از اهمیت زیادی برخوردار است (Daniyan et al., 2017). کود آلی را می‌توان به دو طریق سنتی و صنعتی تولید کرد. در روش صنعتی، دوره تخمیر کوتاه شده و از شیوه‌های مکانیکی برای پردازش مواد و آماده‌سازی آنها استفاده می‌شود. در روش سنتی که بدون استفاده از شیوه‌های مکانیکی به اجرا در می‌آید، زمان تخمیر طولانی‌تر شده و از مواد کاملاً فاسدشدنی استفاده می‌شود (Wei et al., 2021). تفاوت میان کمپوست‌های تولیدی در کیفیت آنها است که به نوع مواد اولیه، روش بکار گرفته شده در تولید و کنترل و مدیریت فرآیند وابسته است (Di Lonardo et al., 2016).

خط تولید کمپوست از مواد زاید جامد شهری شامل سه بخش اصلی پردازش، هوادهی و فرآوری است. در هر کدام از این خطوط، از ماشین‌آلات و تجهیزات ویژه‌ای استفاده می‌شود (Doña-Grimaldi et al., 2019). هدف اصلی در فاز پردازش، جداسازی مواد قابل تبدیل به کمپوست از سایر مواد و کاهش اندازه آنهاست. کاهش اندازه از طریق خردکن یکی از روش‌های پردازش مکانیکی است. پیامد این نوع پردازش، افزایش سطح تماس مواد با باکتری‌ها است (Cimpan et al., 2015). مهمترین تجهیزات خطوط پردازش مکانیکی پسماند عبارتند از نوار نقاله، کیسه بازکن، آهن‌ریا و سرند دوار (Nasrullah et al., 2015). انتقال و حرکت مواد در کارخانه کمپوست معمولاً توسط نوار نقاله‌ها انجام می‌شود. نقاله‌هایی که بطور معمول در تاسیسات کمپوست‌سازی بکار گرفته می‌شوند عبارتند از نقاله‌های تسمه‌ای، نقاله‌های پیچشی، نقاله‌های زنجیری و نقاله‌های پیاله‌ای (Nithikul et al., 2011). نقاله‌های تسمه‌ای از جمله

مواد حجیم به میزان حدود ۱۰ درصد از جریان پسماندها جدا می‌شوند. سپس مواد بازیافتی شامل پلاستیک، کاغذ، مقوا، شیشه و فلزات توسط تجهیزات مکانیکی نظیر جداساز مغناطیسی و ادی کارنت از جریان مواد خارج شده و مورد بازیابی قرار می‌گیرند. از کل جریان مواد ورودی به این بخش، در نهایت تنها هشت درصد مورد بازیافت قرار می‌گیرند. مواد باقی‌مانده برای تبدیل به کمپوست به روش ویندرو، جداسازی می‌شوند. میزان بهره‌وری سیستم در بخش کمپوست ۲۲ درصد می‌باشد. میزان ریجکتی این خط پردازش با توجه به محاسبات موازنه جرمی حدود ۶۳ درصد است. از این میزان مواد ریجکتی، ۹۵ درصد دفن شده و پنج درصد آنها برای بازیابی انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین در تحقیق دیگر، مدل‌سازی موازنه مواد در سیستم پردازش زایدات آلی شهری توسط Banks و همکاران (۲۰۱۱) صورت پذیرفت. این مدل‌سازی در بازه زمانی ۱۴ ماهه انجام شد. در طول این زمان، میزان ۳۹۳۶ تن پسماند وارد سیستم پردازش شده که ۹۵/۵ درصد آن مربوط به زایدات غذایی در مبدا تفکیک شده و مابقی، زایدات غذایی تجاری حاصل از رستوران‌ها و کسب و کارهای محلی (۲/۹ درصد) و زایدات فضای سبز شهری (۱/۶ درصد) بودند. موازنه مواد در این تحقیق برابر با ۹۰/۴ درصد، محاسبه شد. علیرغم اینکه در سال‌های اخیر، کارخانجات کمپوست متعددی در سرتاسر جهان در مقیاس صنعتی احداث و مورد بهره‌برداری قرار گرفته است، اما عموماً میزان بهره‌وری و آنالیز جریان مواد در آنها (بویژه کارخانجاتی که در کشورهای در حال توسعه احداث شده‌اند) هنوز ناشناخته مانده است (Kucbel et al., 2019). تجهیزات بکارگیری شده در بخش پردازش باید بتوانند با راندمان عملکردی مطلوب، مواد قابل تبدیل به کمپوست را از ترکیبات غیرآلی در ترکیب پسماند مخلوط شهری جدا کنند. موازنه مواد از جهت مشخص نمودن ظرفیت سیستم که بطور پایه برای طراحی تسهیلات پردازش مواد مورد استفاده قرار می‌گیرد، حائز اهمیت است (Malakahmad et al., 2017). تاکنون هیچ مطالعه

است که بتوان جریان مواد را در زنجیره پردازش‌های واحد، پیگیری نمود (Pépin Aina et al., 2012). موازنه جرمی در واقع، کاربرد قانون بقای جرم در یک سیستم است. به بیان دیگر، موازنه جرمی عبارت است از معادل قرار دادن جرم کل خوراک ورودی به سیستم با مجموع جرم جریان‌های خروجی (Karunarathna et al., 2014). نتایج چنین آنالیزی را می‌توان در تعیین ظرفیت مناسب واحدهای پردازش مجزا بکار برد (Pognani et al., 2012). با توجه به اهمیت موضوع، تاکنون مطالعات گوناگونی در این زمینه صورت گرفته است. بعنوان مثال Jedrczak و Połomka (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای به مدل‌سازی موازنه مواد در سیستم پردازش مواد زاید جامد شهری Marszów، لهستان پرداختند. مطابق نتایج، ۶۱ درصد از پسماندهای مخلوط شهری به تاسیسات پردازش بیولوژیکی-مکانیکی انتقال داده می‌شوند. این مواد پس از ورود به خط پردازش، بر اساس تفاوت در اندازه در سه محدوده جداسازی می‌شوند. جداسازی در ابتدا برای مواد با اندازه ذرات بین ۱۰ الی ۳۵ میلی‌متر از طریق بکارگیری روش‌های جداسازی با جریان سیکلونی هوا (۳۸/۱ درصد)، جداساز اتوماتیک با لیزر (۲۵/۵ درصد)، جداساز چشمی بر اساس رنگ (۱۴/۵ درصد) و جداساز خرده شیشه (۱۲/۲ درصد) صورت گرفته؛ سپس مواد در محدوده ذرات ۳۵ الی ۸۰ میلی‌متر از طریق جداساز مغناطیسی (۸/۶ درصد)، جداساز با جریان سیکلونی هوا (۴/۱ درصد) و شرودر (۲/۷ درصد) از جریان مواد خارج شده و در نهایت ذرات کوچکتر از ۱۰ میلی‌متر (۵۳/۳ درصد) جداسازی می‌شوند. حدود نیمی از مواد مورد پردازش (۴۵/۹ درصد)، ریجکتی بوده که به لندفیل انتقال یافته و دفن می‌شوند.

در پژوهش دیگر Edo-Alcón و همکاران (۲۰۱۶) مدل‌سازی موازنه مواد برای تاسیسات پردازش پسماندهای مخلوط شهری را انجام دادند. ظرفیت این تاسیسات پردازش که در اسپانیا واقع شده، حدود ۱۲۰ تن در روز می‌باشد. براساس یافته‌ها، ۴۸ درصد از پسماند مخلوط شهری به تاسیسات پردازش انتقال می‌یابند. در ابتدای سیستم پردازش،

جدول ۱- آنالیز کمی و کیفی پسماندهای شهری تولیدی در بابل

درصد وزنی	ترکیب پسماند
۶۵/۳	زایدات آلی
۱/۸	فلزات آهنی
۲/۳	فلزات غیرآهنی
۱/۲	شیشه
۸/۷	کاغذ
۷/۳	پلاستیک
۱۳/۴	زایدات غیرآلی
۱۰۰	مجموع

مأخذ: (شهرداری بابل، ۱۳۹۹)

بر اساس جدول ۱، بیش از ۶۵ درصد پسماندهای تولیدی در شهرستان بابل را زایدات آلی تشکیل می‌دهد که قابلیت تبدیل به کمپوست را دارد. همچنین حجم پسماند شهر بابل در فصل زمستان بیشتر از سایر فصول است. حال آنکه در مورد روستاها، این مورد در خصوص فصل بهار صدق می‌کند. این موضوع، نشان دهنده تنش‌هایی در ترکیب پسماندهای ورودی به انجیل‌سی در مقاطع زمانی مختلف سال می‌باشد.

خط پردازش مواد زاید جامد شهری و تولید کمپوست در کارخانه کمپوست بابل

کارخانه کمپوست بابل در سال ۱۳۷۹ با اعتبار اولیه‌ای معادل ۱۰ میلیارد ریال با هدف کاهش آلودگی‌های محیط‌زیستی و اصلاح و بهبود روش دفع پسماند با ظرفیت پذیرش ۱۰۰ تن پسماند مخلوط شهری در روز احداث گردید. با توجه به افزایش جمعیت شهرستان بابل و به تبع آن، افزایش تولید پسماند و از طرفی، فرسودگی و نقایص فنی خط تولید کمپوست، در سال ۱۳۹۷، پس از حدود ۱۸ سال، شهرداری بابل اقدام به انجام اقدامات اصلاحی در کارخانه مذکور نمود و از بهمن ماه ۱۳۹۷، خط تولید کمپوست با ظرفیت پذیرش ۲۵۰ تن پسماند در روز فعالیت خود را آغاز کرد. میزان تولید کمپوست در خط تولید قدیمی این کارخانه بطور متوسط، حدود سه تن در روز و آن هم، کودی فاقد کیفیت بوده که هیچ توجیهی به لحاظ محیط‌زیستی (با توجه به تولید شیرابه بیشتر در اثر عملکرد

سیستماتیکی در ایران برای مدل‌سازی موازنه جرمی خطوط تولید کمپوست صورت نگرفته است. با توجه به اینکه وجود اطلاعات در این زمینه برای تصمیم‌گیری در خصوص ظرفیت کاری، نوع طراحی و ساخت، آرایش و نحوه چیدمان و جانمایی ماشین‌آلات و تجهیزات و انتخاب و بکارگیری روش راهبری مناسب برای خط تولید صنعتی کمپوست، بسیار لازم و ضروری است؛ لذا مطالعه حاضر با هدف مدل‌سازی موازنه مواد در سیستم پردازش پسماندهای شهری در یک خط تولید صنعتی کمپوست، صورت پذیرفته و با توجه به مشکلات موجود در مناطق مرطوب برای تولید صنعتی کودهای آلی، کارخانه تولید کمپوست شهرستان بابل جهت مطالعه موردی در این خصوص، انتخاب و مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور در ابتدا، موازنه مواد در واحد پردازش کارخانه تولید کمپوست بابل مدل‌سازی شده، سپس میزان تطابق آن با مدل استاندارد تابع انتقال فاکتور بازیابی^۱ مقایسه شده و در نهایت راهکارهای اصلاحی به منظور بهبود راندمان جداسازی مواد در واحد پردازش این کارخانه کمپوست ارایه شده است.

مواد و روش‌ها

ترکیب کمی و کیفی مواد زاید جامد شهری بابل

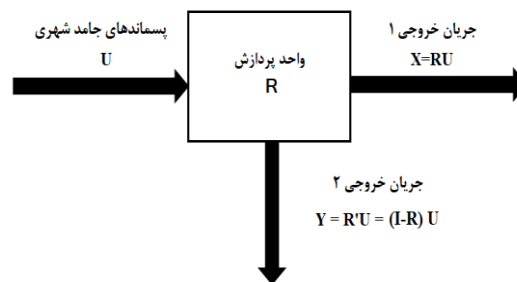
پسماندهای شهری جمع‌آوری شده از سطح شهرستان بابل بطور متوسط حدود ۲۵۰ تن در روز است که به مجتمع پردازش و دفع پسماند انجیل‌سی منتقل می‌گردد. از مجموع حدود ۲۵۰ تن پسماندی که روزانه به انجیل‌سی وارد می‌شود، ۱۸۰ تن مربوط به شهر بابل و ۷۰ تن مربوط به سایر شهرهای شهرستان و روستاهای اطراف می‌باشد. همچنین در محدوده شهر بابل روزانه در حدود ۱۵۰۰ کیلوگرم پسماند بیمارستانی تولید می‌گردد که بخشی از آن در زباله‌سوزهای موجود در بیمارستان‌ها، امحاء و قسمتی نیز بصورت مخلوط با پسماندهای عادی به انجیل‌سی حمل می‌گردد (شهرداری بابل، ۱۳۹۹). جدول ۱، آنالیز کمی و کیفی پسماندهای جامد شهرستان بابل را نشان می‌دهد.

دستگاه مگنت و سیستم راهبری^۲، پیش‌بینی و اجرا شده است (شهرداری بابل، ۱۳۹۹).

مدل‌سازی موازنه مواد در سیستم پردازش پسماندهای شهری با استفاده از تابع انتقال فاکتور بازیابی (RFTF)

تابع انتقال فاکتور بازیابی را می‌توان با یک ماتریس قطری نشان داد که هرکدام از درایه‌های آن، نشانگر درصد اجزای پسماند است که در جریان اصلی مواد پس از آنکه پردازش صورت گرفت، باقی می‌مانند. این اجزا شامل فلزات آهنی، فلزات غیرآهنی، شیشه، کاغذ، پلاستیک، زایدات آلی و غیرآلی می‌باشد. در فرآیند جداسازی مواد زاید جامد شهری در واحد پردازش (شکل ۱)، بردار U ورودی سیستم است که هرکدام از درایه‌های آن، مقادیر اجزای پسماندی را که در بالا فهرست شدند، مشخص می‌کند. مقادیر اجزای پسماند در جریان خروجی ۱ و جریان خروجی ۲ به ترتیب با درایه‌های بردارهای X و Y نشان داده شده‌اند. بردارهای U ، X و Y به ترتیب مطابق رابطه (۳-۱) نوشته می‌شوند.

نامطلوب در بخش تخمیر) و اقتصادی (به لحاظ وجود شیشه و ناخالصی و کمبود مواد مغذی در ترکیب کود تولیدی) نداشته و راندمان تولید آن کمتر از دو درصد حجم مواد ورودی به کارخانه بوده است؛ درحالی‌که در صورت عملکرد مطلوب دستگاه‌ها و مدیریت صحیح فرآیند تولید، میزان تولید کمپوست می‌بایست همانند سایر کارخانجات موفق تولید کمپوست در کشور (نظیر کارخانجات تولید کمپوست مشهد و کرمانشاه) به میزان ۱۰ درصد حجم پسماند ورودی به سایت یعنی حدود ۱۰ تن در روز باشد. تفاوت خطوط قدیمی و جدید پردازش کارخانه کمپوست بابل در سیستم راهبری، تعداد سرند دوار، کیسه‌بازکن، مگنت و ظرفیت پذیرش است؛ به نحوی‌که در خط قدیمی پردازش (با ظرفیت پذیرش ۱۰۰ تن پسماند مخلوط شهری در روز)، یک دستگاه سرند دوار هشت متری بدون مگنت و سایر جداسازهای مکانیکی تعبیه شده در حالی‌که در خط جدید پردازش (با ظرفیت پذیرش ۲۵۰ تن مواد در روز)، دو دستگاه سرند دوار (هشت متری و ۱۲ متری)، یک دستگاه کیسه‌بازکن، دو



شکل ۱- فرآیند جداسازی مواد در واحد پردازش پسماندهای جامد شهری

در جریان اصلی مواد باقی می‌مانند (بعبارتی، Γ_1 نشان دهنده درصد فلزات آهنی، Γ_2 درصد فلزات غیرآهنی و به همین ترتیب). در رابطه (۵)، درایه‌های ماتریس مکمل $R^2=I-R$ که در آن I ماتریس واحد است، درصد هر جزء از جریان پسماند ثانویه را مشخص می‌کنند.

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & r_2 & 0 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & r_n \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$U = \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۳)}$$

درایه‌های ماتریس تابع انتقال فاکتور بازیابی (R) که در رابطه (۴) نشان داده شده، درصد هر جزء پسماند است که

ماتریس قطری است، لذا مقدار درایه i ام Y با ضرب ساده بر اساس رابطه (۷) بدست می‌آید.

$$Y_i = (1-r_i) u_i \quad \text{رابطه (۷)}$$

درایه‌های ماتریس R در مدل تابع انتقال فاکتور بازیابی باید بصورت تحلیلی یا تجربی از داده‌های میدانی تعیین شوند. مقادیر نمونه‌وار اجزای تابع انتقال فاکتور بازیابی برای چند واحد پردازش متداول در جدول ۲ آورده شده است. روش مدل‌سازی تابع انتقال فاکتور بازیابی را می‌توان در محاسبه دیگر خواص توده‌ای پسماند همچون درصد رطوبت، ارزش حرارتی و درصد خاکستر بکار برد (Rhyner et al., 2017).

$$R' = \begin{bmatrix} 1-r_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1-r_2 & 0 & \dots \\ \dots & 0 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 1-r_n \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۵)}$$

مقدار درایه i که در جریان خروجی ۱ در بردار X آمده، نتیجه ضرب ماتریسی $X=R'U$ است. از آنجاییکه R یک ماتریس قطری است، مقدار درایه i ام X با ضرب ساده مطابق رابطه (۶) تعیین می‌شود.

$$X_i = r_i u_i \quad \text{رابطه (۶)}$$

به همین ترتیب، مقادیر جریان خروجی ۲ از ضرب ماتریسی $Y = R'U$ بدست می‌آیند. بدلیل اینکه R' نیز یک

جدول ۲- مقادیر درایه‌های قطری ماتریس تابع انتقال فاکتور بازیابی برای واحدهای پردازش متداول پسماندهای جامد شهری

ترکیب پسماند	سرنند دوار (روسرنندی)	خردکن (بخش جامد)	خردکن (رطوبت)	جداساز مغناطیسی	جداساز هوایی (بخش سبک)	سیکلون (بخش جامد)	سیکلون (رطوبت)
فلزات آهنی	۰/۸	۱	۰/۸	۰/۲	۰/۱	۱	۰/۹
فلزات غیرآهنی	۰/۸	۱	۰/۸	۱	۰/۵	۱	۰/۹
شیشه	۰/۲	۱	۰/۸	۱	۰/۶	۱	۰/۹
کاغذ	۰/۸۵	۱	۰/۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۱	۰/۹
پلاستیک	۰/۹	۱	۰/۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۱	۰/۹
زایدات آلی	۰/۲۵	۱	۰/۸	۱	۰/۲	۱	۰/۹
پسماند غیرآلی	۰/۲۵	۱	۰/۸	۰/۹۵	۰/۷	۱	۰/۹

مأخذ: (Rhyner et al., 2017)

پایه جریان ورودی پسماند در مدل تابع انتقال فاکتور بازیابی قرار گرفت و بر این اساس، محاسبات برای هر دو خطوط پردازش قدیم و جدید کمپوست انجام و دیگرام موازنه مواد استاندارد برای خط پردازش در هر دو وضعیت تهیه شد.

نتایج

با توجه به آنالیز فیزیکی پسماندهای شهرستان بابل (جدول ۱) بعنوان ورودی به خط پردازش و محاسبات صورت گرفته در مدل تابع انتقال فاکتور بازیابی، یک خط پردازش با ظرفیت پذیرش ۱۰۰ تن پسماند مخلوط جامد شهری در روز (هشت ساعت کاری)، متشکل از یک دستگاه

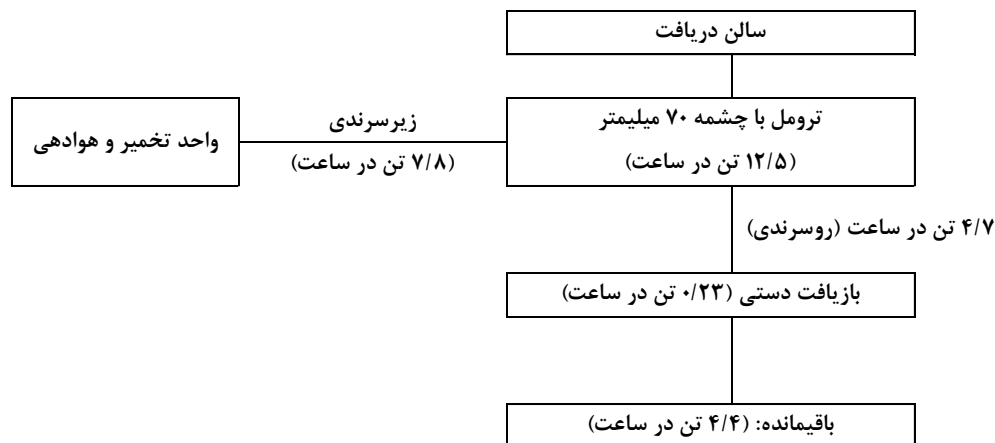
در این پژوهش، برداشت میدانی از ورودی و خروجی هر کدام از دستگاه‌های خط پردازش در مقاطع زمانی مختلف، تحت شرایط استاندارد انجام شد و آنالیز ترکیبات تشکیل دهنده بر اساس تقسیم‌بندی اجزای پسماند در تابع انتقال فاکتور بازیابی (شامل هفت گروه فلزات آهنی، فلزات غیرآهنی، شیشه، کاغذ، پلاستیک، زایدات آلی و غیرآلی) صورت پذیرفت. جهت مقایسه وضعیت موازنه مواد در خطوط پردازش ۱۰۰ و ۲۵۰ تنی پسماند در کارخانه کمپوست بابل با وضعیت استاندارد خروجی مدل تابع انتقال فاکتور بازیابی، آنالیز فیزیکی پسماند ارایه شده توسط مدیریت پسماند شهرداری بابل (جدول ۱)، ملاک محاسبات

۱۰۰ تن پسماند در روز (هشت ساعت کاری) یا ۱۲/۵ تن در ساعت به صورت ۶۲/۸۴ درصد زیرسرنندی و ۳۷/۱۶ درصد روسرنندی می‌باشد. بر این اساس، موازنه جرمی خط پردازش با ظرفیت پذیرش ۱۰۰ تن پسماند مخلوط جامد شهری در روز (هشت ساعت کاری)، متشکل از یک دستگاه سرنند دوار به طول هشت متر، قطر ۲/۲ متر و قطر چشمه ۷۰ میلی‌متر و یک ایستگاه بازیافت دستی برای مواد روسرنندی بصورت شکل ۲ می‌باشد. جدول ۴، مقادیر عددی این موازنه جرمی را نشان می‌دهد.

سرنند دوار به طول هشت متر، قطر ۲/۲ متر و قطر چشمه ۷۰ میلی‌متر و یک ایستگاه بازیافت دستی برای مواد روسرنندی، در هر ساعت ۱۲/۵ تن پسماند را پذیرش می‌کند که از این مقدار، ۷/۸ تن در ساعت بعنوان مواد زیرسرنندی نهایی وارد فاز تخمیر و هوادهی شده و ۴/۴ تن در ساعت بعنوان ریجکتی نهایی خط پردازش، جداسازی می‌گردد. بر اساس محاسبات صورت گرفته در مدل تابع انتقال فاکتور بازیابی، نسبت جداسازی مواد در سرنند دوار خط پردازش با مشخصات مذکور، بصورت جدول ۳ می‌باشد. مطابق جدول ۳، درصد جداسازی مواد در سرنند دوار با ظرفیت پذیرش

جدول ۳- مقادیر استاندارد جداسازی پسماند مخلوط شهری در سرنند دوار با ظرفیت پذیرش ۱۰۰ تن پسماند در روز

مقدار ورودی (درایه U) (تن)	درصد روسرنندی (درایه R)	مقدار باقی‌مانده روسرنندی (درایه X) (تن)	درصد زیرسرنندی (درایه R')	مقدار خارج شده زیرسرنندی (درایه X) (تن)	ترکیب پسماند
۱/۸	۸۰	۱/۴۴	۲۰	۰/۳۶	فلزات آهنی
۲/۳	۸۰	۱/۸۴	۲۰	۰/۴۶	فلزات غیر آهنی
۱/۲	۲۰	۰/۲۴	۸۰	۰/۹۶	شیشه
۸/۷	۸۵	۷/۳۹	۱۵	۱/۳	کاغذ
۷/۳	۹۰	۶/۵۷	۱۰	۰/۷۳	پلاستیک
۶۵/۳	۲۵	۱۶/۳۲	۷۵	۴۸/۹۷	زایدات آلی
۱۳/۴	۲۵	۳/۳۵	۷۵	۱۰/۰۵	پسماند غیر آلی
۱۰۰	-	۳۷/۱۶	-	۶۲/۸۴	مجموع هشت ساعت
۱۲/۵	-	۴/۶۴	-	۷/۸۵	مجموع یک ساعت



شکل ۲- موازنه جرمی خط پردازش با ظرفیت پذیرش ۱۰۰ تن پسماند در روز بر اساس استاندارد خروجی مدل تابع انتقال فاکتور بازیابی

شهری در روز (هشت ساعت کاری)، متشکل از دو دستگاه سرنند دوار (سرنند دوار شماره ۱ به طول ۱۲ متر و قطر ۲/۵ متر و مش درام ۷۰ میلی‌متر و سرنند دوار شماره ۲ به طول هشت متر و قطر ۲/۵ متر و مش درام ۶۰ میلی‌متر) و دو دستگاه مگنت و یک ایستگاه بازیافت دستی برای مواد روسرندی، در هر ساعت ۳۱/۲۵ تن پسماند را پذیرش می‌کند که از این مقدار، ۲۴/۸ تن در ساعت بعنوان مواد زیرسرنندی نهایی وارد فاز تخمیر و هوادهی شده و ۵/۶ تن در ساعت بعنوان ریجکتی نهایی خط پردازش، جداسازی می‌گردد. بر اساس محاسبات صورت گرفته در مدل تابع انتقال فاکتور بازیابی، نسبت جداسازی مواد در سرنند دوار شماره ۱ خط پردازش با مشخصات مذکور، بصورت جدول ۵ می‌باشد.

جدول ۴- مقادیر عددی موازنه جرمی خط پردازش با ظرفیت پذیرش ۱۰۰ تن پسماند در روز بر اساس استاندارد خروجی مدل تابع انتقال فاکتور بازیابی

پارامتر	مقدار
ورودی (تن/ساعت)	۱۲/۵
درصد روسرندی	۳۷/۱۶
تناژ روسرندی (تن/ساعت)	۴/۶۴
درصد زیرسرنندی	۶۲/۸۴
تناژ زیرسرنندی (تن/ساعت)	۷/۸۵
درصد راندمان تفکیک دستی	۵
تناژ تفکیک دستی (تن/ساعت)	۰/۲۳
تناژ ریجکتی نهایی (تن/ساعت)	۴/۴۱

با در نظر گرفتن آنالیز فیزیکی پسماندهای شهرستان بابل (جدول ۱) بعنوان ورودی به خط پردازش و محاسبات صورت گرفته در مدل تابع انتقال فاکتور بازیابی، یک خط پردازش با ظرفیت پذیرش ۲۵۰ تن پسماند مخلوط جامد

جدول ۵- مقادیر استاندارد جداسازی پسماند مخلوط شهری در سرنند دوار شماره ۱ با ظرفیت پذیرش ۲۵۰ تن پسماند در روز بر اساس مدل تابع انتقال فاکتور بازیابی

ترکیب پسماند	مقدار ورودی (درایه U) (تن)	درصد روسرندی (درایه R)	مقدار باقی‌مانده روسرندی (درایه X) (تن)	درصد زیرسرنندی (درایه R')	مقدار خارج شده زیرسرنندی (درایه X) (تن)
فلزات آهنی	۴/۵	۸۰	۳/۶	۲۰	۰/۹
فلزات غیرآهنی	۵/۷۵	۸۰	۴/۶	۲۰	۱/۱۵
شیشه	۳	۲۰	۰/۶	۸۰	۲/۴
کاغذ	۲۱/۷۵	۸۵	۱۸/۴۸	۱۵	۳/۲۶
پلاستیک	۱۸/۲۵	۹۰	۱۶/۴۲	۱۰	۱/۸۲
زایدات آلی	۱۶۳/۲۵	۲۵	۴۰/۸۱	۷۵	۱۲۲/۴۳
پسماند غیرآلی	۳۳/۵	۲۵	۸/۳۷	۷۵	۲۵/۱۲
مجموع هشت ساعت	۲۵۰	-	۹۲/۹	-	۱۵۷/۱
مجموع یک ساعت	۳۱/۲۵	-	۱۱/۶۱	-	۱۹/۶۳

مطابق جدول ۶ می‌باشد. بر اساس جدول ۶، درصد جداسازی مواد در سرنند دوار شماره ۲ با ظرفیت پذیرش ۹۲/۹ تن پسماند در روز (هشت ساعت کاری) یا ۱۱/۶۱ تن در ساعت بصورت ۵۳/۲۲ درصد روسرندی و ۴۶/۷۸ درصد زیرسرنندی می‌باشد. در این بخش باید به این نکته توجه نمود که جریان ورودی پسماند به سرنند دوار شماره ۲ در واقع، خروجی روسرندی سرنند دوار شماره ۱ می‌باشد. در

همانطورکه در جدول ۵ مشاهده می‌گردد، درصد جداسازی مواد در سرنند دوار شماره ۱ با ظرفیت پذیرش ۲۵۰ تن پسماند در روز (هشت ساعت کاری) یا ۳۱/۲۵ تن در ساعت بصورت ۶۲/۸۴ درصد زیرسرنندی و ۳۷/۱۶ درصد روسرندی می‌باشد. بر اساس محاسبات صورت گرفته در مدل تابع انتقال فاکتور بازیابی، نسبت جداسازی مواد در سرنند دوار شماره ۲ خط پردازش با مشخصات مذکور،

مشابه ترکیب پسماند ورودی، یکسان است اما در سرند دوار شماره ۲ خط ۲۵۰ تنی، بواسطه متفاوت بودن آنالیز فیزیکی ترکیب پسماند ورودی (که در واقع همان خروجی روسرندی سرند دوار شماره ۱ است)، متفاوت است.

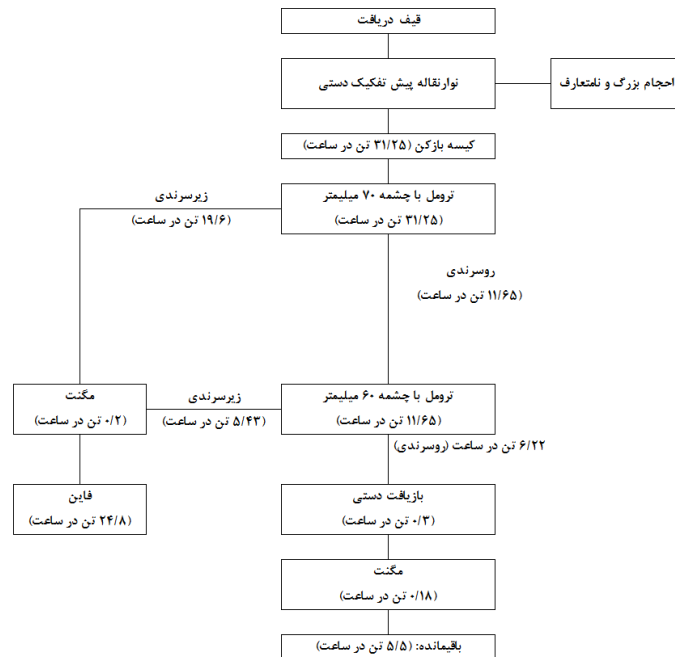
واقع، بر اساس خروجی مدل تابع انتقال فاکتور بازیابی، در وضعیت استاندارد، این آنالیز فیزیکی ترکیب ورودی به سرند دوار است که نسبت خروجی را تعیین می‌کند؛ به همین دلیل است که نسبت جداسازی سرند دوار در خط ۱۰۰ تنی و سرند دوار شماره ۱ در خط ۲۵۰ تنی به علت آنالیز فیزیکی

جدول ۶- مقادیر استاندارد جداسازی پسماند مخلوط شهری در سرند دوار شماره ۲ با ظرفیت پذیرش ۲۵۰ تن پسماند در روز بر اساس مدل تابع انتقال فاکتور بازیابی

ترکیب پسماند	مقدار ورودی (درایه U) (تن)	درصد روسرندی (درایه R)	مقدار باقیمانده روسرندی (درایه X) (تن)	درصد زیرسرندی (درایه R')	مقدار خارج شده زیرسرندی (درایه X) (تن)
فلزات آهنی	۳/۶	۸۰	۲۲/۸	۲۰	۰/۷۲
فلزات غیرآهنی	۴/۶	۸۰	۳/۶۸	۲۰	۰/۹۲
شیشه	۰/۶	۲۰	۰/۱۲	۸۰	۰/۴۸
کاغذ	۱۸/۴۸	۸۵	۱۵/۷۱	۱۵	۲/۷۷
پلاستیک	۱۶/۴۲	۹۰	۱۴/۷۸	۱۰	۱/۶۴
زایدات آلی	۴۰/۸۱	۲۵	۱۰/۲	۷۵	۳۰/۶
پسماند غیرآلی	۸/۳۷	۲۵	۲/۰۹	۷۵	۶/۲۸
مجموع هشت ساعت	۹۲/۹	-	۴۹/۴۷	-	۴۳/۴۲
مجموع یک ساعت	۱۱/۶۱	-	۶/۱۸	-	۵/۴۲

متر و مش درام ۶۰ میلی‌متر) و دو دستگاه مگنت و یک ایستگاه بازیافت دستی برای مواد روسرندی بصورت شکل ۳ می‌باشد. جدول ۷، مقادیر عددی این موازنه جرمی را نشان می‌دهد.

بر این اساس، موازنه جرمی خط پردازش با ظرفیت پذیرش ۲۵۰ تن پسماند مخلوط جامد شهری در روز (هشت ساعت کاری)، متشکل از دو دستگاه سرند دوار (سرند دوار شماره ۱ به طول ۱۲ متر و قطر ۲/۵ متر و مش درام ۷۰ میلی‌متر و سرند دوار شماره ۲ به طول هشت متر و قطر ۲/۵



شکل ۳- موازنه جرمی خط پردازش با ظرفیت پذیرش ۲۵۰ تن پسماند در روز

جدول ۷- مقادیر عددی موازنه جرمی خط پردازش با ظرفیت پذیرش ۲۵۰ تن پسماند در روز بر اساس استاندارد خروجی مدل تابع انتقال فاکتور بازیابی

مقدار	پارامتر	خط پردازش
۳۱/۲۵	ورودی (تن/ساعت)	
۳۷/۱۶	درصد روسرندی	
۱۱/۶۱	تناژ روسرندی (تن/ساعت)	سرنده ۱۲ متری
۶۲/۸۴	درصد زیرسرندی	
۱۹/۶۳	تناژ زیرسرندی (تن/ساعت)	
۱۱/۶۱	ورودی (تن/ساعت)	
۵۳/۲۲	درصد روسرندی	
۶/۱۸	تناژ روسرندی (تن/ساعت)	سرنده هشت متری
۴۶/۷۸	درصد زیرسرندی	
۵/۴۳	تناژ زیرسرندی (تن/ساعت)	
۶/۱۸	ورودی (تن/ساعت)	
۵	درصد راندمان تفکیک دستی	تفکیک دستی
۰/۳	تناژ تفکیک دستی (تن/ساعت)	
۰/۱۱	ورودی از زیرسرندی دوار ۱۲ متری (تن/ساعت)	
۰/۰۹	ورودی از زیرسرندی دوار هشت متری (تن/ساعت)	
۰/۲	مجموع ورودی (تن/ساعت)	مگنت زیرسرندها
۱۰۰	درصد راندمان مگنت	
۰/۲	تناژ حذف شده توسط مگنت (تن/ساعت)	
۰/۳۶	ورودی از روسرندی دوار هشت متری (تن/ساعت)	
۱۰۰	درصد راندمان مگنت	
۰/۳۶	تناژ حذف شده توسط مگنت (تن/ساعت)	مگنت ریجکتی
۵/۵۱	تناژ ریجکتی نهایی (تن/ساعت)	

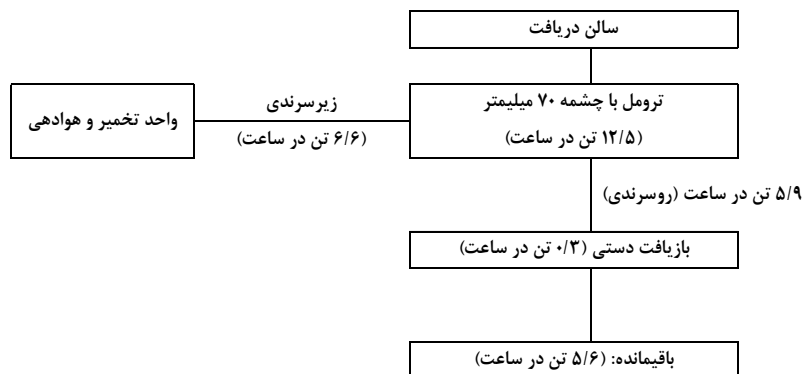
خط قدیمی کارخانه کمپوست بابل با ظرفیت پذیرش ۱۰۰ تن پسماند در روز (هشت ساعت کاری) یا ۱۲/۵ تن در ساعت بصورت ۵۲/۷۸ درصد زیرسرندي و ۴۷/۲۲ درصد روسرندي می‌باشد. بر این اساس، موازنه جرمی خط پردازش قدیمی کارخانه کمپوست بابل با ظرفیت پذیرش ۱۰۰ تن پسماند مخلوط جامد شهری در روز (هشت ساعت کاری)، بصورت شکل ۴ می‌باشد. جدول ۹، مقادیر عددی این موازنه جرمی را نشان می‌دهد.

به منظور مقایسه وضعیت موازنه جرمی در خطوط پردازش ۱۰۰ تنی و ۲۵۰ تنی پسماند در کارخانه کمپوست بابل با وضعیت استاندارد خروجی مدل تابع انتقال فاکتور بازیابی، نتایج آنالیز در خصوص خروجی سرندي دوار خط قدیمی ۱۰۰ تنی در جدول ۸ آورده شده است.

بر اساس برداشت میدانی و آنالیز فیزیکی و محاسبات صورت گرفته در مدل تابع انتقال فاکتور بازیابی، که نتایج آن در جدول ۸ ذکر شده، نسبت جداسازی مواد در سرندي دوار

جدول ۸- مقادیر جداسازی پسماند مخلوط شهری در سرندي دوار خط قدیمی ۱۰۰ تنی کارخانه کمپوست بابل

ترکیب پسماند	مقدار ورودی (درایه U) (تن)	درصد روسرندي (درایه R)	مقدار باقیمانده روسرندي (درایه X) (تن)	درصد زیرسرندي (درایه R')	مقدار خارج شده زیرسرندي (درایه X) (تن)
فلزات آهنی	۱/۸	۶۳	۱/۱۳	۳۷	۰/۶۶
فلزات غیر آهنی	۲/۳	۶۴	۱/۴۷	۳۶	۰/۸۲
شیشه	۱/۲	۹	۰/۱	۹۱	۱/۰۹
کاغذ	۸/۷	۵۶	۴/۸۷	۴۴	۳/۸۲
پلاستیک	۷/۳	۵۶/۷	۴/۱۳	۴۳/۳	۳/۱۶
زایدات آلی	۶۵/۳	۴۸	۳۱/۳۴	۵۲	۳۳/۹۵
پسماند غیر آلی	۱۳/۴	۳۱	۴/۱۵	۶۹	۹/۲۴
مجموع هشت ساعت	۱۰۰	-	۴۷/۲۲	-	۵۲/۷۷
مجموع یک ساعت	۱۲/۵	-	۵/۹	-	۶/۵۹



شکل ۴- موازنه جرمی خط پردازش قدیمی کارخانه کمپوست بابل

بابل با ظرفیت پذیرش پسماند ۲۵۰ تن در روز به ترتیب در جداول ۱۰ و ۱۱ آورده شده است.

نتایج آنالیز فیزیکی صورت گرفته از نسبت جداسازی سرنديهای دوار شماره ۱ و ۲ خط پردازش کارخانه کمپوست

جدول ۹- مقادیر عددی موازنه جرمی خط پردازش قدیمی کارخانه کمپوست بابل

مقدار	پارامتر
۱۲/۵	ورودی (تن/ساعت)
۴۷/۲۲	درصد روسرندی
۵/۹	تناژ روسرندی (تن/ساعت)
۵۲/۷۸	درصد زیرسرندی
۶/۵۹	تناژ زیرسرندی (تن/ساعت)
۵	درصد راندمان تفکیک دستی
۰/۲۹	تناژ تفکیک دستی (تن/ساعت)
۵/۶	تناژ ریجکتی نهایی (تن/ساعت)

۲۵۰ تنی کارخانه کمپوست بابل با میزان ورودی ۳۱/۲۵ تن پسماند در ساعت، مواد را به نسبت ۵۰/۲۸۲ درصد روسرندی و ۴۹/۱۸ درصد زیرسرندی جداسازی می‌نماید. این مقادیر برای سرند دوار هشت متری این خط با میزان ورودی ۱۵/۸۷ تن پسماند در ساعت، به ترتیب، ۵۲/۹۶ درصد روسرندی و ۴۷/۰۴ درصد زیرسرندی می‌باشد. بر این اساس، موازنه جرمی خط پردازش جدید کارخانه کمپوست بابل با ظرفیت پذیرش ۲۵۰ تن پسماند مخلوط جامد شهری در روز (هشت ساعت کاری)، بصورت شکل ۵ می‌باشد. جدول ۱۲، مقادیر عددی این موازنه جرمی را نشان می‌دهد.

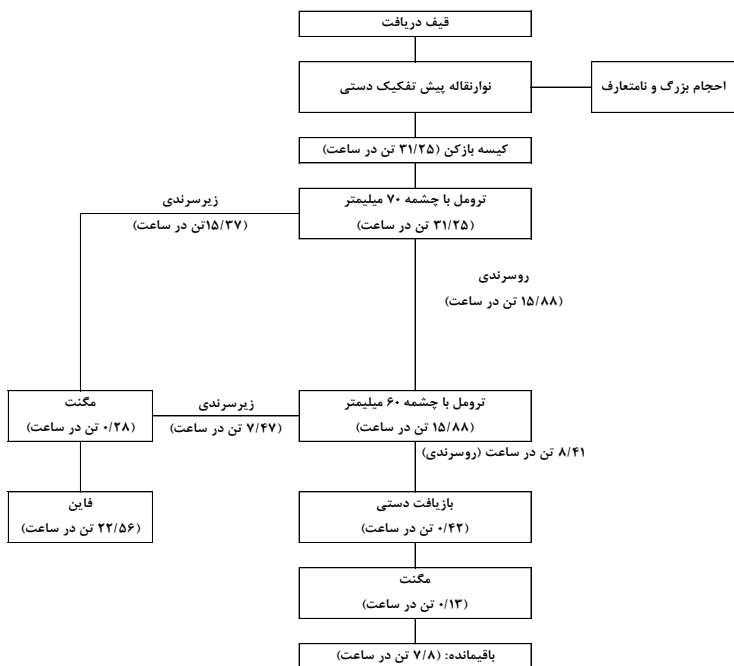
نتایج آنالیز فیزیکی و محاسبات صورت گرفته در جداول ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهد که سرند دوار ۱۲ متری خط پردازش

جدول ۱۰- مقادیر جداسازی پسماند مخلوط شهری در سرند دوار شماره ۱ خط جدید ۲۵۰ تنی کارخانه کمپوست بابل

مقدار خارج شده زیرسرندی (درایه X) (تن)	درصد زیرسرندی (درایه R')	مقدار باقیمانده روسرندی (درایه X) (تن)	درصد روسرندی (درایه R)	مقدار ورودی (درایه U) (تن)	ترکیب پسماند
۱/۳۹	۳۱	۳/۱	۶۹	۴/۵	فلزات آهنی
۱/۴۳	۲۵	۴/۳۱	۷۵	۵/۷۵	فلزات غیرآهنی
۲/۶۴	۸۸	۰/۳۶	۱۲	۳	شیشه
۷/۸۸	۳۶/۲۵	۱۳/۸۶	۶۳/۷۵	۲۱/۷۵	کاغذ
۴/۸۶	۲۶/۶۵	۱۳/۳۸	۷۳/۳۵	۱۸/۲۵	پلاستیک
۸۱/۶۲	۵۰	۸۱/۶۲	۵۰	۱۶۳/۲۵	زایدات آلی
۲۳/۱۱	۶۹	۱۰/۳۸	۳۱	۳۳/۵	پسماند غیرآلی
۱۲۲/۹۶	-	۱۲۷/۰۳	-	۲۵۰	مجموع هشت ساعت
۱۵/۳۷	-	۱۵/۸۷	-	۳۱/۲۵	مجموع یک ساعت

جدول ۱۱- مقادیر جداسازی پسماند مخلوط شهری در سرند دوار شماره ۲ خط جدید ۲۵۰ تنی کارخانه کمپوست بابل

مقدار خارج شده زیرسرندی (درایه X) (تن)	درصد زیرسرندی (درایه R')	مقدار باقیمانده روسرندی (درایه X) (تن)	درصد روسرندی (درایه R)	مقدار ورودی (درایه U) (تن)	ترکیب پسماند
۰/۸۸	۲۸/۵	۲/۲۲	۷۱/۵	۳/۱	فلزات آهنی
۱/۱۲	۲۶	۳/۱۹	۷۴	۴/۳۱	فلزات غیرآهنی
۰/۳۱	۸۸	۰/۰۴	۱۲	۰/۳۶	شیشه
۵/۱۱	۳۶/۸۶	۸/۷۵	۶۳/۱۴	۱۳/۸۶	کاغذ
۳/۶۶	۲۷/۴	۹/۷۱	۷۲/۶	۱۳/۳۸	پلاستیک
۴۱/۳	۵۰/۶	۴۰/۳۲	۴۹/۴	۸۱/۶۲	زایدات آلی
۷/۳۵	۷۰/۸	۳/۰۳	۲۹/۲	۱۰/۳۸	پسماند غیرآلی
۵۹/۷۵	-	۶۷/۲۸	-	۱۲۷/۰۳	مجموع هشت ساعت
۷/۴۶	-	۸/۴۱	-	۱۵/۸۷	مجموع یک ساعت



شکل ۵- موازنه جرمی خط پردازش جدید کارخانه کمپوست بابل

جدول ۱۲- مقادیر عددی موازنه جرمی خط پردازش جدید کارخانه کمپوست بابل

مقدار	پارامتر	خط پردازش
۳۱/۲۵	ورودی (تن/ساعت)	
۵۰/۸۲	درصد روسرندی	
۱۵/۸۷	تناژ روسرندی (تن/ساعت)	سرنده ۱۲ متری
۴۹/۱۸	درصد زیرسرندی	
۱۵/۳۷	تناژ زیرسرندی (تن/ساعت)	
۱۵/۸۷	ورودی (تن/ساعت)	
۵۲/۹۶	درصد روسرندی	
۸/۴۱	تناژ روسرندی (تن/ساعت)	سرنده هشت متری
۴۷/۰۴	درصد زیرسرندی	
۷/۴۶	تناژ زیرسرندی (تن/ساعت)	
۸/۴۱	ورودی (تن/ساعت)	
۵	درصد راندمان تفکیک دستی	تفکیک دستی
۰/۴۲	تناژ تفکیک دستی (تن/ساعت)	
۰/۱۷	ورودی از زیرسرندی دوار ۱۲ متری (تن/ساعت)	
۰/۱۱	ورودی از زیرسرندی دوار هشت متری (تن/ساعت)	
۰/۲۸	مجموع ورودی (تن/ساعت)	مگنت زیرسرندی‌ها
۱۰۰	درصد راندمان مگنت	
۰/۲۸	تناژ حذف شده توسط مگنت (تن/ساعت)	
۰/۲۷	ورودی از روسرندی دوار هشت متری (تن/ساعت)	
۰/۲۷	مجموع ورودی (تن/ساعت)	مگنت ریجکتی
۱۰۰	درصد راندمان مگنت	
۰/۲۷	تناژ حذف شده توسط مگنت (تن/ساعت)	
۷/۷۱	تناژ ریجکتی نهایی (تن/ساعت)	

بحث و نتیجه گیری

ایستگاه بازیافت دستی) بوده که نسبت به خروجی استاندارد مدل تابع انتقال فاکتور بازیابی با نسبت مواد ورودی یکسان، به میزان ۹/۶ درصد مواد آلی کمتری را جداسازی نموده و به همین میزان، درصد مواد ریجکتی نهایی آن که جهت دفن بهداشتی به لندفیل حمل می گردد، بیشتر است. جزئیات این مقایسه در جدول ۱۳ آورده شده است.

نتایج این پژوهش نشان داد که نسبت جداسازی مواد در واحد پردازش پسماند خط تولید قدیمی کمپوست بابل با ظرفیت پذیرش ۱۰۰ تن در روز و با مشخصات ذکر شده، بصورت ۵۲/۸ درصد مواد آلی (دارای قابلیت تبدیل به کمپوست)، ۴۴/۸ درصد ریجکتی نهایی (پسماندهای دفنی) و ۲/۴ درصد مواد دارای ارزش اقتصادی (استحصال شده در

جدول ۱۳- مقایسه راندمان خط پردازش قدیمی کارخانه کمپوست بابل بر اساس وضعیت واقعی و خروجی استاندارد مدل تابع انتقال فاکتور بازیابی ۱

شاخص	خروجی استاندارد مدل تابع انتقال فاکتور بازیابی	نتیجه آنالیز میدانی	اختلاف آنالیز میدانی و خروجی استاندارد
درصد مواد آلی	۶۲/۴	۵۲/۸	-۹/۶
درصد استحصال	۲/۴	۲/۴	۰
درصد ریجکتی نهایی	۳۵/۲	۴۴/۸	۹/۶
مجموع	۱۰۰	۱۰۰	-

تابع انتقال فاکتور بازیابی با نسبت مواد ورودی یکسان، به میزان ۷/۱۷ درصد مواد آلی و ۰/۱۹ درصد مواد دارای ارزش اقتصادی را کمتر جداسازی نموده و به همین میزان، درصد مواد ریجکتی نهایی آن که جهت دفن بهداشتی به لندفیل حمل می گردد به میزان ۷/۳۶ درصد بیشتر است. این مقایسه در جدول ۱۴ نشان داده شده است.

همچنین نسبت جداسازی مواد در واحد پردازش پسماند خط تولید جدید کمپوست بابل با ظرفیت پذیرش ۲۵۰ تن در روز و با مشخصات ذکر شده، بصورت ۷۲/۱۹ درصد مواد آلی (دارای قابلیت تبدیل به کمپوست)، ۲۴/۹۶ درصد ریجکتی نهایی (پسماندهای دفنی) و ۲/۸۵ درصد مواد دارای ارزش اقتصادی (استحصال شده در ایستگاه بازیافت دستی و توسط مگنت ها) بوده که نسبت به خروجی استاندارد مدل

جدول ۱۴: مقایسه راندمان خط پردازش جدید کارخانه کمپوست بابل بر اساس وضعیت واقعی و خروجی استاندارد مدل تابع انتقال فاکتور بازیابی

شاخص	خروجی استاندارد مدل تابع انتقال فاکتور بازیابی	نتیجه آنالیز میدانی	اختلاف آنالیز میدانی و خروجی استاندارد
درصد مواد آلی	۷۹/۳۶	۷۲/۱۹	-۷/۱۷
درصد استحصال	۳/۰۴	۲/۸۵	-۰/۱۹
درصد ریجکتی نهایی	۱۷/۶	۲۴/۹۶	۷/۳۶
مجموع	۱۰۰	۱۰۰	-

پذیرش ۲۵۰ تن در روز) دارای عملکردی بهتر نسبت به خط پردازش قدیمی این کارخانه (با ظرفیت پذیرش ۱۰۰ تن

مقایسه اطلاعات جداول ۱۳ و ۱۴ نشان می دهد که خط پردازش جدید کارخانه تولید کمپوست بابل (با ظرفیت

درصد کیسه‌های باز نشده است. در بخش فرآوری نهایی، کمپوست تولید شده توسط سرند دوار با مش ۱۰ میلی‌متری، دانه‌بندی شده و بدین ترتیب، ناخالصی‌هایی از قبیل اجزای تجزیه‌ناپذیر و غیرآلی (عمدتاً پلاستیک) از آن جدا می‌شود. در نهایت، ۲۷٫۶ درصد از حجم کل پسماندهای مخلوط ورودی به خط تولید، تبدیل به کمپوست می‌شود.

در پژوهش دیگر، Karunarathna و همکاران (۲۰۱۴) موازنه مواد زاید جامد شهری در کارخانه تولید کمپوست شهرداری Bandarawela، سریلانکا را مورد بررسی قرار دادند. کارخانه مذکور، روزانه پذیرای ۱۸ تن از پسماندهای مخلوط شهری است که این مواد پس از ورود به خط تولید و تفکیک اولیه (که بصورت دستی صورت می‌پذیرد) پس از پشته‌گذاری به روش ویندرو وارد فاز فرآوری می‌شوند. نتایج این تحقیق نشان داد که حجم مواد پشته‌گذاری شده، معادل ۶۶ درصد از حجم کل مواد ورودی به کارخانه کمپوست بوده که بعد از گذشت مدت زمان لازم برای رسیدن و عمل‌آوری کمپوست، در نهایت ۲۸ درصد از کل مواد، تبدیل به کمپوست می‌شوند؛ این در حالیست که بخش زیادی از مواد (چیزی در حدود ۴۰ درصد)، بعنوان مواد ریجکتی به محل دفن انتقال می‌یابند.

همچنین، Pèpin Aina و همکاران (۲۰۱۲) مدل‌سازی موازنه مواد در خط تولید کمپوست را برای سه شهر مختلف در فرانسه، آفریقای شمالی و آفریقای غربی انجام دادند. براساس یافته‌های این مطالعه، بطور متوسط پلاستیک‌های کوچک، کاغذ، مقوا و شیشه در عملیات جداسازی، به میزان ۰٫۱-۰٫۲ درصد بعنوان مواد ریجکتی از جریان پسماند خارج می‌شوند. این مقدار، کمتر از ۱٫۵ درصد از کل ترکیب پسماندهای شهری ورودی به خط تولید را شامل می‌شود. در فاز پردازش، ۶۳ درصد از پسماندهای بزرگتر از ۵۵ میلی‌متر شامل پارچه و پلاستیک، توسط سرند دوار جداسازی می‌شوند. این زایدات، شامل ۱۳/۶ درصد مواد تجزیه‌پذیر و ۳۳ درصد اجزای کوچک مقیاس هستند. همچنین ۴۵ درصد از فلزات با اندازه بزرگتر از ۵۰ میلی‌متر،

پسماند در روز) است؛ به نحویکه خط جدید توانسته میزان پسماندهای دفنی (ریجکتی نهایی خط پردازش) را به میزان ۱۹/۸۴ درصد نسبت به خط قدیمی کاهش دهد. همچنین با راه‌اندازی خط پردازش جدید، میزان مواد آلی جداسازی شده که جهت تولید کمپوست به فاز تخمیر و هوادهی منتقل می‌شود را به میزان ۱۹/۳۹ درصد افزایش داده و نسبت مواد استحصال‌شده دارای ارزش اقتصادی را نیز به میزان ۰/۴۵ درصد بهبود بخشیده است. علیرغم عملکرد مطلوبتر خط پردازش جدید کارخانه کمپوست بابل نسبت به خط پردازش قدیمی این کارخانه، مقایسه خروجی استاندارد مدل تابع انتقال فاکتور بازیابی برای خطی با مشخصات خط جدید کارخانه کمپوست بابل با نتایج حاصل از آنالیز میدانی نسبت جداسازی این خط نشان می‌دهد که عملکرد این خط با خروجی استاندارد این مدل فاصله دارد. جهت بهبود عملکرد خط پردازش و نزدیک شدن نسبت‌های جداسازی به مقادیر استاندارد خروجی مدل تابع انتقال فاکتور بازیابی، اجرای اقدامات اصلاحی شامل بکارگیری تجهیزات دمنده و مکنده، تجهیزات اپتیک، ادی کانت و انجام تنظیمات کالیبراسیون برای دستگاه کیسه بازکن توصیه می‌گردد.

در مطالعه مشابه صورت گرفته، Pognani و همکاران (۲۰۱۲) به مدل‌سازی موازنه مواد در خصوص پسماندهای آلی موجود در ترکیب مواد زاید جامد شهری ورودی به یک خط تولید صنعتی کمپوست در شهر Barcelona، اسپانیا پرداختند. بررسی جریان مواد در خط تولید مورد مطالعه، وجود دو بخش از مواد ریجکتی شامل ریجکتی بخش پیش‌پردازش و ریجکتی بخش فرآوری کمپوست را نشان داد. نتایج این پژوهش مشخص کرد که در مرحله پیش‌پردازش (که وظیفه جداسازی پسماندهای آلی از غیرآلی را بر عهده دارد)، حدود ۳۲ درصد از پسماند تر اولیه، وارد بخش ریجکتی شده و در نهایت، دفن می‌گردد. ترکیب این بخش از ریجکتی‌ها شامل ۴۴/۰۱ درصد زایدات آلی، ۳۸/۸۵ درصد پلاستیک و شیشه، ۷/۳۶ درصد فلزات، ۵/۶۶ درصد زایدات سبز (برگ‌ها، شاخه‌ها و گیاهان کوچک) و ۴/۱۲

هزینه می‌شود؛ ضمن اینکه هر کیلوگرم زباله خشک ۷ هزار ریال ارزش اقتصادی دارد (شهرداری بابل، ۱۳۹۹). بر این اساس، تغییرات ایجاد شده در خط پردازش کارخانه کمپوست بابل، روزانه به میزان ۵۹۵/۲ میلیون ریال از هزینه‌های دفن پسماند را کاهش داده و به میزان ۷/۸۴ میلیون ریال، درآمد شهرداری بابل را به ازای فروش مواد دارای ارزش اقتصادی افزایش می‌دهد. با توجه به احجام حاصل از مطالعات میدانی و محاسبات صورت گرفته و همچنین با در نظر گرفتن فاکتورهایی نظیر کمبود زمین برای دفن، نیروی انسانی، ماشین‌آلات و تجهیزات مورد نیاز، انرژی مصرفی و سایر عوامل دخیل در فرآیند تولید کمپوست و دفن پسماند، هزینه‌کرد ۱۰/۶۲ میلیارد ریالی شهرداری بابل برای طراحی، ساخت و راه‌اندازی خط پردازش در کارخانه کمپوست انجیل‌سی، در یک بازه زمانی شش ماهه جبران می‌گردد (جدول ۱۵).

توسط جداساز مغناطیسی اولیه و بخش اعظم فلزات با اندازه ۲۰-۵۰ میلی‌متر، توسط جداساز مغناطیسی ثانویه، جداسازی می‌گردد. در انتها، تنها ۳۹ درصد از کل مواد ورودی به خط تولید، تبدیل به کمپوست می‌شوند. اختلاف در نتایج بدست آمده می‌تواند ناشی از تنوع در کمیت و کیفیت زایدات تولیدی، فناوری و فاکتورهای زمانی و مکانی متفاوت باشد. تحلیل اطلاعات حاصل از مطالعات میدانی نشان می‌دهد که اصلاحات صورت گرفته در راستای ارتقای ظرفیت پذیرش پسماند در خط پردازش کارخانه کمپوست بابل، منجر به کاهش ۴۹/۶ تنی حجم مواد ریجکتی، بهبود جداسازی مواد قابل تبدیل به کمپوست به میزان ۴۸/۴۷ تن و بهبود استحصال مواد خشک دارای ارزش اقتصادی به میزان ۱/۱۲ تن در روز شده است. بر اساس اطلاعات استعلامی از مدیریت پسماند شهرداری بابل، در کارخانه تولید کمپوست انجیل‌سی برای دفن هر کیلوگرم زباله ۱۲ هزار ریال و برای تولید هر کیلوگرم کمپوست ۱۵ هزار ریال

جدول ۱۵- ارزیابی اقتصادی پروژه بهسازی خط پردازش مواد زاید جامد شهری و تولید کمپوست در کارخانه کمپوست بابل

شاخص	حجم بهبود فرآیند (تن در روز)	بهای واحد برای هر کیلوگرم (هزار ریال)	میزان کاهش هزینه یا افزایش درآمد (میلیون ریال)
کاهش مواد ریجکتی	۴۹/۶	۱۲	۵۹۵/۲
بهبود جداسازی مواد قابل تبدیل به کمپوست	۴۸/۴۷	۱۵	۷۲۷/۰۵
بهبود استحصال مواد دارای ارزش اقتصادی	۱/۱۲	۷	۷/۸۴

یادداشت‌ها

1. Recovery Factor Transfer Function (RFTF)
2. Programmable logic controller (PLC)

تشکر و قدردانی

نویسندگان مراتب تقدیر و تشکر خود را از شهرداری بابل به واسطه همکاری موثر در روند اجرای تحقیق و ارائه اطلاعات مورد نیاز اعلام می‌دارند.

منابع

شهرداری بابل، (۱۳۹۹). دورنمای پروژه‌های مدیریت پسماند شهرستان بابل، بخش مدیریت پسماند، حوزه معاونت خدمات شهری شهرداری بابل، بابل.

Banks, C. J., Chesshire, M., Heaven, S. & Arnold, R. (2011). Anaerobic digestion of source-segregated domestic food waste: Performance assessment by mass and energy balance. *Bioresource Technology*, 102(2), 612-620.

- Cimpan, C., Maul, A., Jansen, M., Pretz, T. & Wenzel, H. (2015). Central sorting and recovery of MSW recyclable materials: A review of technological state-of-the-art, cases, practice and implications for materials recycling. *Journal of Environmental Management*, 156, 181-199.
- Daniyan, I.A., Omokhuale, A.M., Aderoba, A.A., Ikumapayi, O.M. & Adaramola, B.A. (2017). Development and performance evaluation of organic fertilizer machinery. *Cogent Engineering*, 4, 1364044.
- Di Lonardo, M.C., Lombardi, F. & Gavasci, R. (2012). Characterization of MBT plants input and outputs: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 11, 353-363.
- Di Lonardo, M.C., Franzese, M., Costa, G., Gavasci, R. & Lombardi, F. (2016). The application of SRF vs. RDF classification and specifications to the material flows of two mechanical-biological treatment plants of Rome: comparison and implications. *Waste Management*, 47, 195-205.
- Doña-Grimaldi, V.M., Palma, A., Ruiz-Montoya, M., Morales, E. & Diaz, M.J. (2019). Energetic valorization of MSW compost valorization by selecting the maturity conditions. *Journal of Environmental Management*, 238, 153-158.
- Edo-Alcón, N., Gallardo, A. & Colomer-Mendoza, F.J. (2016). Characterization of SRF from MBT plants: Influence of the input waste and of the processing technologies. *Fuel Processing Technology*, 153, 19-27.
- Hande, A.S. & Deshpande, A.A. (2014). Methodology for Design & Fabrication of Portable Organic Waste Chopping Machine to Obtain Compost-A Review. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 1(7), 132-135.
- Hosseinalizadeh, R., Izadbakhsh, H. & Shakouri, H. (2021). A planning model for using municipal solid waste management technologies- considering Energy, Economic, and Environmental Impacts in Tehran-Iran. *Sustainable Cities and Society*, 65, 102566.
- Karunarathna, A.K., Awanthi, W.T., Ariyawansa, R.T.K. & Weerasekara, I.A.C.S. (2014). Solid Mass Balance of MSW Composting: A Case Study from Bandarawela Municipality, Sri Lanka. *Waste Management & Resource Utilisation*, 271-277.
- Kucbel, M., Růžičková, J., Raclavská, H. & Švédová, B. (2019). Properties of composts from household food waste produced in automatic Composters. *Journal of Environmental Management*, 236, 657-666.
- Malakahmad, A., Idrus, N.B., Abualqumboz, M. S., Yavari, S. & Kutty, S.R. (2017). In-vessel co-composting of yard waste and food waste: an approach for sustainable waste management in Cameron Highlands, Malaysia. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 6(2): 149-157.
- Nasrullah, M., Vainikka, P., Hannula, J. & Hurme, M. (2015). Elemental balance of SRF production process: solid recovered fuel produced from commercial and industrial waste. *Fuel*, 145, 1-11.
- Nithikul, J., Karthikeyan, O.P. & Visvanathan, C. (2011). Reject management from a mechanical biological treatment plant in Bangkok, Thailand. *Resource, Conservation and Recycling*, 55(4), 417-422.
- Pépin Aina, M., Mama, D., Adounkpe, J., Charnay, F., Deguenon, J., Adjahatode, F. & Matejka, G. (2012). Realization of the Mass Balance in the Production of Compost in Developing Countries a Comparative Study. *American Journal of Scientific Research*, 65, 24-41.
- Pognani, M., Barrena, R., Font, X., Scaglia, B., Adani, F. & Sánchez, A. (2010). Monitoring the organic matter properties in a combined anaerobic/aerobic full-scale municipal source-separated waste treatment plant. *Bioresource Technology*, 101, 6873-6877.
- Pognani, M., Barrena, R., Font, X. & Sánchez, A. (2012). A complete mass balance of a complex combined anaerobic/aerobic municipal source-separated waste treatment plant. *Waste Management*, 32, 799-805.
- Połomka, J. & Jedrczak, A. (2020). RDF from Compost-Like-Output's Produced in the MBT Installation in the Case of Marszów, Poland. *Energies*, 13, 4353.
- Rhyner, C.R., Schwartz, L.J., Wenger, R.B. & Kohrell, M.J. (2017). *Waste Management and Resource Recovery* (1st edition). CRC Press.

- Shabanali Fami, H., Aramyan, L.H., Sijtsema, S. & Alambaigi, A. (2021). The relationship between household food waste and food security in Tehran city: The role of urban women in household management. *Industrial Marketing Management*, 97, 71-83.
- Schievano, A., D'Imporzano, G., Salati, S. & Adani, F. (2011). On-field study of anaerobic digestion full-scale plants (Part I): an on-field methodology to determine mass, carbon and nutrients balance. *Bioresource Technology*, 102, 7737-7744.
- Wei, Y., Wang, N., Lin, Y., Zhan, Y., Ding, X., Liu, Y., Zhang, A., Ding, G., Xu, T. & Li, J. (2021). Recycling of nutrients from organic waste by advanced compost technology- A case study. *Bioresource Technology*, 337, 125411.