

Оптимизација анализе токова материјала применом AI алата

Optimization of Material Flow Analysis by AI tools

Александар Кокановић, Факултет техничких наука, Нови Сад

Студијски програм – ИНЖЕЊЕРСТВО ЗАШТИТЕ ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ

Кратак садржај – Овај рад приказује савремени приступ интеграцији вештачке интелигенције (AI) у материјал флоу анализу (Material Flow Analysis – MFA), са циљем побољшања праћења, предвиђања и оптимизације токова материјала у системима управљања отпадом. Посебан акценат дат је на припрему података, примену машинског учења у предикцији трендова и на могућности дигиталне трансформације MFA кроз алате попут KNIME и Orange. Представљени су кључни изазови, предности и перспективе интегрисаног приступа AI–MFA у контексту циркуларне економије и индустрије 4.0.

Кључне речи : анализа токова материјала (material flow analysis), вештачка интелигенција, машинско учење, управљање отпадом, циркуларна економија

Abstract – This paper presents a modern approach to integrating Artificial Intelligence (AI) into Material Flow Analysis (MFA), aimed at improving the monitoring, prediction, and optimization of material flows within waste management systems. Special emphasis is placed on data preparation, the application of machine learning for trend prediction, and the potential for digital transformation of MFA through tools such as KNIME and Orange. The paper highlights key challenges, advantages, and perspectives of the integrated AI–MFA approach in the context of the circular economy and Industry 4.0.

Keywords: material flow analysis, artificial intelligence, machine learning, waste management, circular economy

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Немања Станисављевић, ред. проф.

1. УВОД

Савремено управљање отпадом представља један од најсложенијих изазова одрживог развоја. Пораст количине отпада, ограничени капацитети депонија и потреба за ефикаснијом употребом ресурса довели су до примене системских метода за праћење токова материјала. Material flow analysis (MFA) омогућава квантитативну процену улазних, излазних и складиштенних токова унутар дефинисаног система, засновану на закону очувања масе [1].

Међутим, традиционални приступ MFA често је ограничен великим бројем ручних корака у обради података, као и недовољном флексибилношћу приликом предвиђања динамичких промена у системима. Развој алата вештачке интелигенције (AI) и машинског учења (ML) омогућио је прелазак са статичких на динамичке MFA моделе (dMFA), који укључују временску, просторну и контекстуалну компоненту анализе [2], [3].

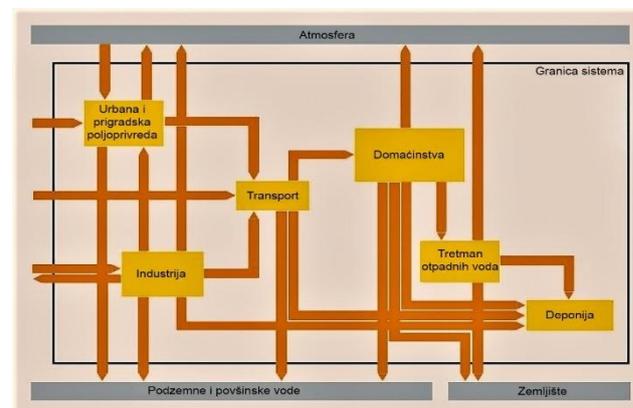
Циљ овог рада је да се прикаже како интеграција AI технологија у MFA може да унапреди квалитет анализе, повећа поузданост резултата и омогући ефикасније доношење одлука у области управљања отпадом и ресурсима.

2. ПРЕГЛЕД АЛАТА И ЊИХОВЕ ИНТЕГРАЦИЈЕ У MFA

2.1. Основни принципи и развој MFA

Према Brunner и Rechberger [1], MFA је систематска метода за процену токова и залиха материјала унутар дефинисаног система у простору и времену. Главни кораци обухватају:

- (1) дефинисање система и граница,
- (2) идентификацију релевантних процеса,
- (3) прикупљање и верификацију података,
- (4) израду масеног биланса,
- (5) интерпретацију резултата.



Слика 1. Основни концепт система за анализу токова материјала (MFA), <https://sswm.info/sswm-university-course/module-4-sustainable-water-supply/further-resources-water-sources-software/material-flow-analysis-%28mf%29> (делимично прерађено)

MFA се у почетку примењивала у анализи загађења и управљању отпадом, али је данас проширена на области као што су ресурсна ефикасност, урбани метаболизам и процена циркуларности система. Интеграција са LCA (Life Cycle Assessment) и GIS анализом омогућава просторну и еколошку компоненту у истраживању.

2.2. Савремени софтверски алати и дигитална интеграција

Софтвери као STAN, Umberto, GaBi, као и модели засновани на Excel окружењу, најчешће се користе у практичним анализама. STAN је прилагођен визуелизацији токова и проверу биланса масе, док Umberto омогућава повезивање процеса и процену енергетске ефикасности.

Са појавом Индустије 4.0, развијају се решења која омогућавају повезивање MFA система са сензорским и IoT мрежама, чиме се подаци прикупљају у реалном времену и користе за даље моделовање [2]. Такви приступи представљају основу за интеграцију вештачке интелигенције, која омогућава предикцију и оптимизацију материјалних токова.

3. AI У ПРИПРЕМИ И СТРУКТУРИРАЊУ ПОДАТАКА ЗА MFA

3.1. Аутоматизована припрема и чишћење података

Један од главних изазова MFA је хетерогеност и непотпуност података. AI алати омогућавају аутоматизовано препознавање образаца, попуњавање недостајућих вредности и откривање аномалија. Алгоритми као што су Random Forest Imputer и KNN Imputer често се користе за ову сврху у оквиру AI платформи попут KNIME и Orange [3].

Ови приступи значајно смањују време обраде података и повећавају поузданост масеног биланса. На пример, код анализе комуналног отпада, систем може аутоматски да препозна сезонске варијације у генерисању и да их укључи у предиктивни модел.

3.2. Интеграција података из више извора

Савремене MFA студије користе комбинацију административних података, сензорских мерења и геопросторних база. AI алати омогућавају спајање ових извора у јединствену структуру података, где се обавља унакрсна провера и калибрација података. У Табели 1. су приказане врсте и извори података који су релевантни за MFA моделе.

Табела 1. Врсте и извори података релевантни за MFA моделе

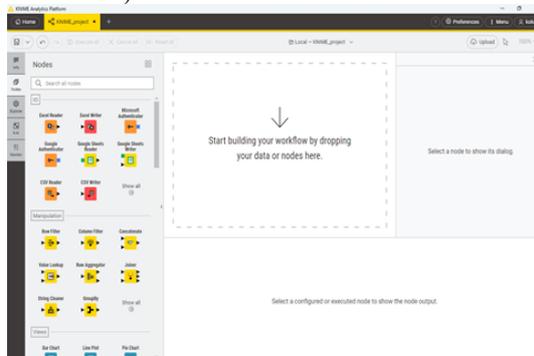
Vrsta podatka	Izvor	Tipični problem	AI rešenje
Količina otpada po frakcijama	SEPA, RZS	Nepotpuni vremenski nizovi	Interpolacija pomoću modela mašinskog učenja

Tokovi reciklaže i odlaganja	JKP „Čistoća“	Neusaglašene kategorije otpada	Automatska klasifikacija i semantičko mapiranje
Ekonomski pokazatelji (BDP, investicije)	RZS, Eurostat	Neusaglašene godine i formati	Standardizacija i normalizacija jedinica
GIS podaci o lokacijama	Lokalni GIS servisi	Različite projekcije	Geokodiranje i transformacija koordinata
Naučni radovi i izveštaji	Tehnička literatura	Tekstualni, nestrukturirani podaci	NLP ekstrakcija i generisanje tabela

Такав интегрисани систем података омогућава формирање „дигиталних близанаца“ (digital twins) који симулирају понашање реалног система и предвиђају могуће сценарије у управљању отпадом.

3.3. AI алати у KNIME и Orange окружењима

Orange Data Mining и KNIME су алати који омогућавају визуелно програмирање, без потребе за дубоким знањем кодирања. У њима се могу комбиновати чворови за унос података (Excel Reader), обраду (Missing Value, Normalizer), анализу (Linear Regression, Decision Tree, XGBoost) и визуелизацију (Scatter Plot, Line Chart).



Слика 2. Почетни интерфејс софтвера KNIME Analytics Platform

4. ПРИМЕНА МАШИНСКОГ УЧЕЊА У ПРЕДИКЦИЈИ ТРЕНДОВА У ТРЕТМАНУ ОТПАДА

4.1. Типови модела и избор параметара

У оквиру MFA, машинско учење може се користити за:

- 1) прогнозу количине отпада по секторима,
- 2) процену капацитета постројења,
- 3) анализу емисија гасова и енергијских токова.

Најчешће коришћени модели су Random Forest, Support Vector Machine (SVM), XGBoost и Neural Network. Сваки модел има своје предности: Random

Forest пружа стабилност и отпорност на преобучавање, XGBoost има високу прецизност у табеларним подацима, док Neural Network добро обрађује комплексне нелинеарности.

4.2. Студија случаја – процена материјалних залиха у путној инфраструктури

Jang et al. [4] развили су модел машинског учења за побољшање процене материјалних залиха и уграђених емисија у путној инфраструктури. Модел комбинује податке о типовима материјала, дужини и старости путева, као и податке о CO₂ емисијама. Резултати показују да примена ML метода смањује грешку процене за више од 20% у односу на класичне статистичке методе.

4.3. Потенцијал примене у локалним условима

У контексту Србије, овакви модели могу бити од изузетног значаја за предвиђање количина грађевинског и комуналног отпада, као и за дефинисање стратегија третмана у складу са ЕУ директивама о отпаду и циркуларној економији [5], [6].

5. ОГРАНИЧЕЊА, ПРЕДНОСТИ И МОГУЋНОСТИ УНАПРЕЂЕЊА МОДЕЛА У ОКВИРУ MFA ПРИСТУПА

Главна ограничења интеграције AI у MFA односе се на доступност поузданих података, сложеност моделирања и потребу за мултидисциплинарним приступом. Недостатак стандардизованих база података често онемогућава потпуно аутоматизовану анализу. Такође, AI модели захтевају калибрацију и валидацију на реалним системима.

С друге стране, AI у MFA доноси бројне предности:

- 1) убрзану анализу великог броја променљивих,
- 2) прецизнију предикцију будућих трендова,
- 3) визуелизацију комплексних токова,
- 4) могућност креирања адаптивних сценарија за различите политике управљања отпадом.

Према Geng et al. [6], развој националних индикатора циркуларне економије заснованих на AI и дигиталним технологијама може постати основа за нови модел праћења одрживости.

6. АНАЛИЗА ПОДАТАКА ПУТЕМ AI АЛАТА И МОГУЋНОСТИ ПРИМЕНЕ У СИСТЕМИМА УПРАВЉАЊА ОТПАДОМ

Савремени AI системи омогућавају анализу података у реалном времену кроз dashboard окружења и дигиталне близанце система управљања отпадом. На пример, системи могу аутоматски да идентификују прекорачења капацитета постројења или неефикасне токове материјала.

Такви системи интегришу податке из IoT сензора, административних извештаја и предиктивних модела. На овај начин омогућена је анализа кључних индикатора као што су стопа искоришћења отпада, учешће секундарних сировина, емисије CO₂ и економска исплативост мера [2], [7].

Овакав приступ представља корак ка „паметним системима управљања отпадом“, где се одлуке заснивају на подацима, а не на статичким плановима. То омогућава бољу ефикасност, смањење трошкова и усаглашеност са циљевима климатске неутралности.

7. ЗАКЉУЧАК

Интеграција вештачке интелигенције у материјал флоу анализу представља кључни корак ка дигиталној трансформацији управљања отпадом. Комбинацијом метода MFA и AI добијају се модели који омогућавају динамичко праћење токова материјала, предвиђање емисија и процену ефикасности политика.

Иако постоје техничка и методолошка ограничења, потенцијали за примену су огромни – од побољшања квалитета података до оптимизације целокупног система управљања отпадом у складу са принципима циркуларне економије.

Будући радови треба да се фокусирају на развој отворених база података, интеграцију AI са GIS и LCA моделима и примену дигиталних близанаца у праћењу еколошких и економских параметара MFA система.

8. ЛИТЕРАТУРА

- [1] P. H. Brunner and H. Rechberger, Practical Handbook of Material Flow Analysis, CRC Press, 2003.
- [2] Y. Zhou, “AI-driven digital circular economy with material and energy sustainability for Industry 4.0,” Energy and AI, vol. 20, 2025.
- [3] S. Raut et al., “Application of artificial intelligence in circular economy: A critical analysis,” Sustainable Futures, vol. 9, 2025.
- [4] A. Jang et al., “Development of a machine learning model to improve estimates of material stock and embodied emissions of roads,” Journal of Cleaner Production, 2024.
- [5] K. Allesch and P. H. Brunner, “Material Flow Analysis as a Decision Support Tool for Waste Management,” Waste Management & Research, vol. 35, no. 5, 2017.
- [6] G. Geng, Q. Fu, and Y. Sarkis, “National circular economy indicators and digital transformation,” Resources, Conservation & Recycling, vol. 166, 2021.
- [7] OECD, Artificial Intelligence in Environmental and Resource Management, OECD Publishing, Paris, 2022.

Кратка биографија:



Александар Кокановић рођен је у Шапцу 2001. године и одрастао Горњој Врањској. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Инжењерство заштите животне средине одбранио је 2025.год.
Контакт:
akokanovic@outlook.com