

ENERGIAGAZDÁLKODÁS

Az Energiagazdálkodási Tudományos Egyesület szakfolyóirata

A magyar energiagazdaság problémáit tárgyaló tudományos és gyakorlati folyóirat

Dr. Gróf Gyula főszerkesztő
Tel.: +36 1 463 2613 E-mail: grof@energia.bme.hu

Büki András tervező szerkesztő
Tel: +36 30 521 4743 E-mail: bukiandras@t-online.hu

Kocsis Kende
Egyetemi hallgató
BME Gépészmérnöki Kar

IGAZOLÁS

Kérésére igazolom, hogy az **ENERGIAGAZDÁLKODÁS** szakfolyóirat 2024. év 3. számában való közlésre elfogadtuk

Kocsis Kende, Kövendi József szerzők

Budapest második hulladékhasznosító művének logisztikai értékelése
című cikkét

A cikk bibliográfiai adatai:
Energiagazdálkodás, 65 évfolyam, 2024/3. szám

Budapest, 2024. május 29.



Dr. Gróf Gyula
főszerkesztő

Budapest második hulladékhasznosító művének logisztikai értékelése

Kocsis Kende

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Gépészmérnöki Kar, Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszék
kende.kocsis@gmail.com

Kövendi József

Pázmány Péter Katolikus Egyetem,
Információs Technológiai és Bionikai Kar
1083 Budapest, Práter utca 50/A

Budapesten évente mintegy 680-700 000 tonna települési szilárd hulladék keletkezik, amelynek kevesebb mint 2/3-át hasznosítják újra vagy hasznosítják energetikai célokra, a többi a hulladéklerakóban végzi. Ennek a környezeti és logisztikai problémának a leküzdésére javasoltak egy második hulladékhasznosító üzem telepítését a város déli részén. A hulladékból energiát előállító erőművek (WtE-erőművek) esetében a tüzelőanyag-fogyasztáshoz kapcsolódó egyetlen költség a szállítási költség, mivel a városi vezetés gazdasági támogatást nyújt a hulladék ártalmatlanításához. Mivel a szállítás nagyban befolyásolja az üzemeltetési költségeket, a szállítási útvonalak logisztikai optimalizálása közvetlen költségmegtakarítást ígér. Ebben a tanulmányban a Dél-Budapesti terület logisztikai optimalizálását képelemzés és logikai alapú algoritmusprogramozás segítségével végeztük el. Ennek eredményeként 230 000 kilogramm települési szilárd hulladék (MSW) optimális szállítását oldották meg, ami havi 4 835,2 km utazási távolság csökkenését eredményezte. Ez az érték 2 894 351 Ft költség, 9 459,6 kg CO₂ és 45,3 kg NO_x kibocsátás csökkenést jelent havonta a városi területeken.

*

Budapest produces around 680-700 000 tonnes of municipal solid waste per year, less than 2/3 of which is recycled or reused for energy purposes, the rest ends up in landfills. To overcome this environmental and logistical problem, a second waste treatment plant has been proposed in the south of the city. For waste-to-energy plants (WtE plants), the only cost related to fuel consumption is the transport cost, as the city administration provides economic support for the disposal of waste. Since transport has a major impact on operating costs, logistical optimisation of transport routes promises direct cost savings. In this study, the logistic optimization of the South Budapest area was carried out using image analysis and logic-based algorithm programming. As a result, the optimal transport of 230 000 kg of municipal solid waste (MSW) was solved, resulting in a reduction of 4 835.2 km of travel distance per month. This value represents a cost reduction of 2 894 351 HUF, 9 459.6 kg CO₂ and 45.3 kg NO_x emissions per month in urban areas.

Világszerte éves szinten 1,3 trillió tonna települési szilárd hulladék termelődik, amely fejenként 180 kg/évet jelent. Feltételezhetően 2025-ig ez 2,2 trillió tonnára fog emelkedni. A fejlett országokban, mint az Európai Unió országaiban és az USA-ban ez az érték jelentősen magasabb. Az EU szabályozási rendszerének megfelelően a leghatékonyabb hulladékkezelési módszerek a megelőzés, az újrahasznosítás és az energetikai hasznosítás. A legrosszabb

megoldás a települési szilárd hulladék depókban történő lerakása helyigény, az esztétikai és környezetkárosító hatások, illetve a bomlás során keletkező, nem hasznosított metán atmoszférába történő kiengedése miatt. Ebből adódóan egy második hulladékhasznosító mű telepítése Budapest városgazdálkodásában kiemelt jelentőségű lehet. A Budapesten termelődő 680 000 – 700 000 tonna/év települési szilárd hulladék (TSZH) jelenleg nagyrészt a pusztázatori hulladéklerakóba kerül. A válogatás nélküli lerakás a legnagyobb környezetterhelést jelenti mind az elfoglalt terület, mind pedig a talajszennyezés szempontjából, ezért ellentétes az EU hulladékkezelési stratégiájával.

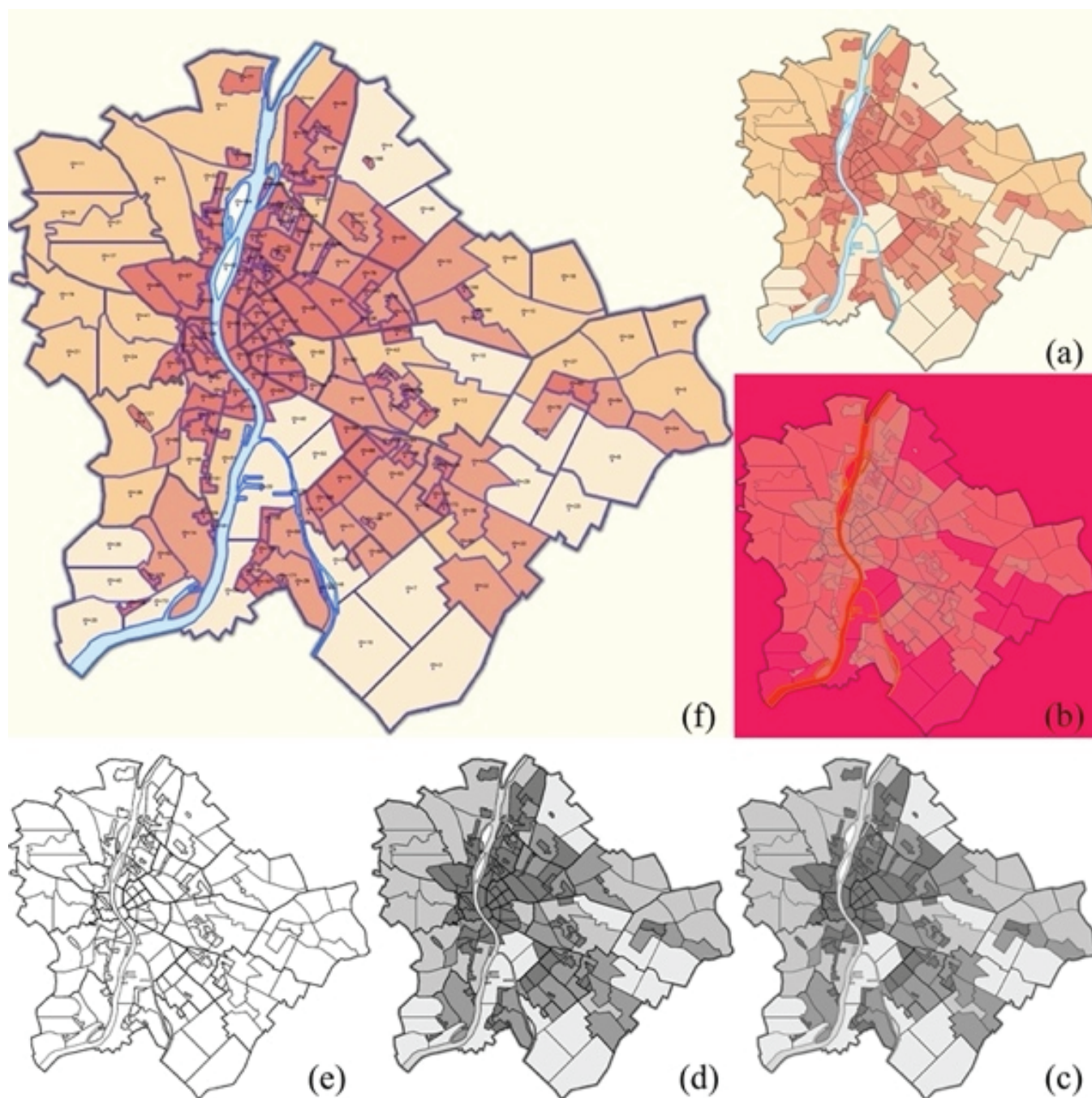
Jelen tanulmányban az előzetes tervek alapján az Ócsai út és az M0-ás autópálya kereszteződéséhez telepítendő HUHA 2 hulladékhasznosító erőmű hulladékbeszállításának optimalizálásával foglalkozunk. A hulladékhasznosító erőművek esetében kiemelkedő jelentősége van a hulladékszállítás költségének, mivel a hulladék megsemmisítéséért a budapesti önkormányzattól 2017-es adatok szerint 8 446 Ft/tonna díjat kapnak. Ezek alapján a tüzelőanyag egyetlen költsége maga a beszállítási költség, amelynek csökkentésével direkt módon lehet befolyásolni az üzemelési költséget és ezáltal a hulladékhasznosító erőmű versenyképességét növelni a földgáztüzelésű energiatermeléssel szemben.

A beszállításához szükséges anyagi költségeket és a hozzá rendelt kibocsátási értékek csökkentésével versenyképesebbé válhat a hulladékhasznosítás, mint energiatermelő erőforrás és lecsökkenthetjük Budapest távhőrendszerének és elektromos ellátásának földgáz függését, valamint nem utolsósorban redukálhatjuk a beszállítási tevékenység során keletkező környezeti szennyezést.

Módszertan

Keletkező hulladékmennyiség meghatározása

A szállítási útvonalak optimalizálásának érdekében egy egyszerűsített megközelítés került alkalmazásra, amely során Budapestet zónákra lett felbontva, majd minden egyes zóna számára egy központi pont lett meghatározva, ahonnan a hulladék begyűjtésre kerül. A modell pontosságának növelése érdekében a meghatározott gyűjtési zónákat a kerületekhez képest jóval kisebb méretűvé tettük, így összesen 182 zónát kaptunk. A modell szerint a hulladékgyűjtő járművek a javasolt üzemtől indulnak, a lehető legrövidebb úton haladva a célzóna kijelölt középpontjáig. A középpont elérését követően a kapacitásuknak megfelelő mennyiségű hulladékot összegyűjtik és visszaszállítják a WtE-üzembe. Ez az eseménylánc addig folytatódik, amíg a WtE-üzem szilárdhulladék-kapacitása el nem éri a célpontot. A begyűjtési útvonalak meghatározásához helyalapú TSZH termelődési adatbázisra van szükség. A tanulmányhoz szükséges adatok beszerzése érdekében felvettük a kapcsolatot a budapesti FKF Zrt-vel, sajnos eredménytelenül, mivel a tanulmány készítésé-



1. ábra. (a) Budapest népsűrűségi adatai finomított zónákkal, (b) a HSV színcsatornába konvertált térkép, a szürke skálázott térkép a hisztogram-módosítás előtt (d) és után (c), és a képelemzés eredménye: Budapest az összes azonosított zónával és geometriai középponttal (e) [1]

nek időpontjában ilyen adatbázissal nem rendelkeztek. Ezen információ hiányosság leküzdésére alternatív módszert választottunk: képi alapú információ kinyerést végeztünk a népsűrűségi térképekből képfeldolgozással.

Az 1(a). ábra az elemzési módszerben alkalmazott népsűrűségi térképet mutatja. A képfeldolgozásra azért volt szükség, mert a térkép nem tartalmazott az egyes zónák méretét részletező információkat. Az ábrák szín- és térbeli adatait használtuk fel a terület, a népsűrűség és így a jelzett zónák népességének meghatározására. Magyarországon az Európai Parlament által közzétett adatok szerint évente 381 kg hulladék keletkezik egy főre vetítve [2], [1]. A népsűrűség és a számított zóna területadatok alapján meghatároz-

ható az adott zóna lakosságszáma, amely alapján meghatározható az övezetekben keletkező települési szilárd hulladék mennyisége. Az elemzésért felelős algoritmus Python nyelven íródott. Ezt a programozási nyelvet használtuk a tanulmány során minden algoritmus esetében. A program alapvető feladata a zónák körvonalainak felismerése és elkülönítése volt a képen, területük mérése, e területek elkülönítése önálló grafikus fájlakká, majd az egyes területek geometriai középpontjainak meghatározása. Az első lépés az, hogy az elemzendő képet betápláljuk a programba. Ez a kép azonban még mindig sok olyan információt tartalmaz, amely zajnak vagy zavaró hatásnak minősül és megakadályozza, hogy az algoritmus pontosan meghatározza a zónák körvonalait. Ennek elkerülése

érdekében a következő módszert alkalmaztuk: először a kép színvezérlési sémáját RGB színmodellről HSV színmodellre alakítjuk át. Ezzel a módszerrel az R (Red), G (Green) és B (Blue) helyett a színcsatornák H (Hue), S (Saturation) és V (Value) értéket vesznek fel. A HSV (hue, saturation, value; más néven HSB, hue, saturation, brightness) az RGB színmodell alternatív ábrázolása, amelyet az 1970-es években terveztek számítógépes grafikusok, hogy jobban megfeleljen az emberi látás színérzékelési tulajdonságainak. Lehetővé teszi, hogy jobban meg tudjuk különböztetni a kép képpontjainak intenzitását, az eredmények az 1. ábrán láthatók. Az átalakítás nagyban leegyszerűsíti a szűrési folyamatot, mivel a HSV színösszetételben a színadatokat csak egy csatorna, a V tartalmazza, nem pedig három csatorna, mint az RGB esetében. Az intenzitáskülönbségek alapján a megfelelő határértékek megválasztásával a Duna szakaszai elkülöníthetők a kép többi részétől, így a folyó nem jelenik meg a térkép zonális felismerésében. A jobb oldali kinagyított képen megfigyelhetők a Duna és a környező területek közötti éles kontúrok. A kiválasztott Duna-képet egy maszk létrehozásával különítjük el. Ez a maszk később a folyó területének elkülönítésére szolgál. A bemeneti képet szürkeárnyaltos képpé, azaz színes képből fekete-fehér képpé alakítjuk át, hogy az algoritmust ne zavarják a színek. A Duna területének korábban létrehozott, szintén fekete-fehér maszkját erre a képre helyezzük rá, megakadályozva a folyó zónaként való besorolását. A kontúrvonalak további megkülönböztetése érdekében a kép hisztogramját megnyújtottuk, megváltoztattuk oly módon, hogy a sötét tónusok tovább sötétedjenek, a világosak pedig tovább világosodjanak. Ezt követően a képet küszöbértékelésnek vetették alá, amelynek eredményeképpen a szürke minden árnyalata eltűnt, kivéve a legsötétebb színt, amely a zónák kontúrvonalait jelentette. Ezután a kontúrok meghatározásával elkülöníthetjük az általuk körülvett zónákat. Minden egyes zónát a pontos terület és geometriai középpont adatokkal azonosítottunk, illetve a zóna területének nagysága alapján ID azonosítószámot rendeltünk hozzá. A területet a képen található összes pixelszám és a zónákon belül elhelyezkedő pixelek száma közötti összefüggés alapján határoztuk meg a kifejezetten Budapestre számított pixel/km² arányossági tényező segítségével. Az azonosított zónákat az eredeti térképre vissza maszkoltuk, így kaptuk meg az 1. (e) ábrát. A városon belül 182 övezetet azonosítottunk. Minden egyes zónára kiszámítható a keletkező hulladék mennyisége a népsűrűség, a számított zónaterületek és a magyarországi fajlagos hulladéktermelési index alapján, amely 381 kg (szilárd hulladék)/fő/év. A számítási módszer az alábbiakban látható:

$$m_{TSZH} = f_{nép} \cdot A_{kerület} \cdot \dot{m}_{TSZH, fajlagos}$$

Ahol:

- m_{TSZH} = heti TSZH termelés [kg/hét]
- $f_{nép}$ = népsűrűség [fő/km²]
- $A_{kerület}$ = zóna területe [km²]
- $\dot{m}_{TSZH, fajlagos}$ = fajlagos TSZH termelés [kg/fő/év]

TSZH begyűjtési útvonalak meghatározása

A középpontokhoz földrajzi koordinátákat társítottunk, hogy a későbbiekben lehetővé tegyük az útvonal-szimulációkat. Ezeket a középpontokat hipotetikus gyűjtőpontokként határoztuk meg az egyes zónák számára. Ezt követően a 182 rendelkezésre álló középpontból csak 100-at használtak fel a szimulációkban, mivel a többi 82 zónát a már meglévő, Észak-Budapesten található HUHA 1 hullá-

dékhasznosító erőmű látta el. A koordinátákhoz tartozó 100 középpontból egy teljes gráfot építettünk fel, hogy az útvonaloptimalizáló algoritmus számára lehetővé tegyük a szabad útvonalválasztást. A gráf 100 csúccsal és így 9900 éllel rendelkezett, mivel a valós életben az A → B útvonal a legtöbbször nem egyenlő a B → A útvonallal az útlezárások, az egyirányú utak és az esetleges forgalmi dugók miatt, ami jobb alternatív útvonalakat eredményez. Egy algoritmust fejlesztettünk ki a középpontok közötti 9900 útvonal szimulálására a egy térképészeti adatbázis - program segítségével. Ezen eredmények alapján a grafikon kétféleképpen lett súlyozva. Először is a gráf csúcsaihoz egy változó értéket rendeltünk, amely a zónákban mindenkor található hulladék mennyiségét ábrázolja. Másodsor, a csúcsokat összekötő élekhez a korábban szimulált középpontok közötti tényleges távolságértékeket rendeltük. Így a gyűjtési folyamat során a zónák között megtett teljes úthossz meghatározható volt, de a tényleges gyűjtési folyamat során a zónákon belül megtett úthosszra vonatkozóan nincs információ, mivel minden egyes zónát csak egy-egy csúcspont reprezentál. E probléma leküzdésére egy arányszámon alapuló módszert dolgoztunk ki a zónán belül megtett távolság számszerűsítésére a szemeteskosci fennmaradó üres kapacitásának és a zóna hulladéksűrűségének függvényében. A zónánként megtett úthossz meghatározásához létrehoztuk a fajlagos úthossz fogalmát, ami megadja, hogy egy egységnyi területen hány kilométer úthossz helyezkedik el. Ez az érték átlagosan $a = 24,9$ km/km² lett Budapest területére nézve. A fajlagos úthossz segítségével ki lehet számolni az egy zónában található úthossz értékét. Ezen érték segítségével fogjuk tudni kiszámolni az egyes zónákban megtett út hosszát a begyűjtött hulladékmennyiség függvényében.

$$l = A_{kerület} \cdot a$$

Ahol:

- l = Úthossz [km]
- a = Fajlagos úthossz [km/km²]

Ezt a számítást azért alkalmazhattuk, mert feltételeztük, hogy az összes keletkező hulladék begyűjtéséhez a járműveknek végig kell haladnia az összes utca teljes hosszán. Ezzel a számítási móddal a sűrűn lakott területek esetén jóval kevesebb úthosszt kell bejárni a szállító járműnek egy egységnyi hulladék felvételéhez, mint egy gyéren lakott területen, ami megfelel a való életben tapasztalt helyzetnek. Ennek vizualizálására létrehoztuk a lineáris TSZH sűrűséget, ami megadja, hogy mekkora úthosszt kell bejárni a szállító járműnek egy egységnyi hulladékmennyiség felvételéhez. Az úthosszak azonosításával meg tudtuk határozni, hogy egy zóna hulladék-kiürítéséhez hány liter üzemanyagra van szükségünk figyelembe véve, hogy a szemétszállító járművek átlagos fogyasztása 73 l/100 km [3].

Az esetek túlnyomó részében egyetlen jármű azonban nem képes egy zóna kiürítésére, emiatt a 8 tonnányi hulladék szállítókapa-

$$V_{kocsi} = \frac{k}{f_{TSZH} \cdot l} \cdot \dot{V} \cdot \frac{l}{100}$$

Ahol:

- V_{kocsi} = Egy jármű fogyasztása 8 tonna kapacitás esetén [l]
- k = Szállítókapa-
citás [kg], üres állapotban 8000 kg
- $\dot{V}$ = Fajlagos üzemanyag fogyasztás [l/100 km]

Az optimalizálás logikája

Az ellátott zónák meghatározása

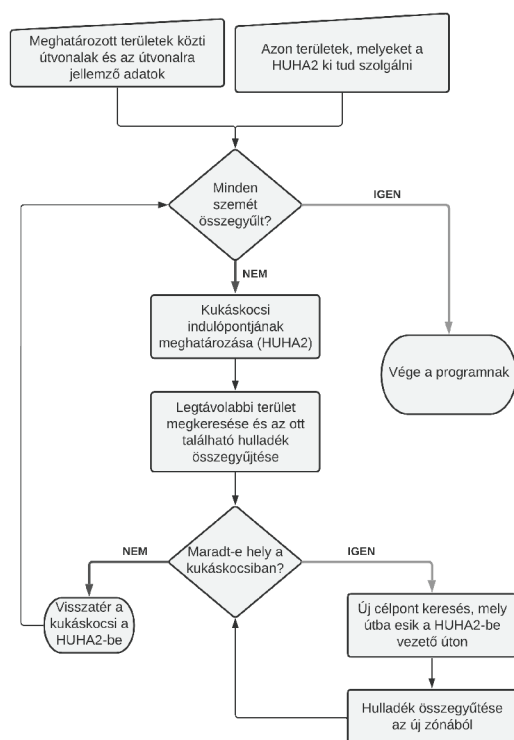
Az elemzett WtE-erőmű maximális kapacitása évi 230 000 tonna szilárd hulladék. Ezt az értéket nagymértékben meghaladja a grafikus rendszerben jelenleg használt 100 meghatározott zónában található hulladék mennyisége. Az erőmű nem tudja ellátni a teljes meghatározott területet, mivel korlátozott kapacitással rendelkezik, amelyet nem lehet túllépni, ezért egy másik algoritmus került kidolgozásra, amelynek célja a legelőnyösebb, ténylegesen ellátható zónák meghatározásának segítése. Ez az algoritmus három egyszerű elven alapult:

- előnyben kell részesítenie a WtE-üzemhez közelebb eső zónákat,
- ha egy zónát „megnyitottak” – a hulladékgyűjtés megkezdődött –, a zónát teljesen ki kell üríteni, nem maradhat benne szilárd hulladék nyoma,
- a WtE-üzem maximális kapacitását nem lehet túllépni.

Ezeket a szempontokat szem előtt tartva az algoritmus meghatározta az optimális ellátandó zónákat. Az eredményeket a későbbiekben az Eredmények részben mutatjuk be.

Útvonaloptimalizáló algoritmus

Mivel az összes lehetséges útvonalkombinációt és a lehetséges zónákat a fentiek szerint meghatároztuk, az optimalizáló algoritmus megtervezéséhez szükséges összes információ biztosított volt. Az optimalizálás módszere egy saját fejlesztésű, logikai kapukon alapuló algoritmus volt a számításokhoz használt csúcspontok hatalmas mennyisége miatt. Az e pontok közötti optimális útvonal kiszámítása heurisztikus algoritmusokkal vagy lineáris egészértékű programozással óriási számítási erőforrásokat igényelne, ami az optimalizálást rendkívül hatékonytalanná tenné, ezért a saját fejlesztésű algoritmus e probléma leküzdésére készült. Az algoritmus logikáját a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra. Az útvonaloptimalizáló algoritmus logikai folyamatábrája

Az algoritmus először azt elemzi, hogy az összes hulladékot begyűjtötték-e a megadott zónákban vagy sem. Ha bármelyik zónában maradt hulladék, a települési hulladékszállító jármű elhagyja a hulladékhasznosító üzemet. Az első érdekes pont az erőműtől legtovábbi csúcspont lesz. Ennek a döntésnek az oka a következő:

1. Az összes korábban azonosított zónát kivétel nélkül ki kell üríteni, így a legtávolabbi csúcspot mindenképpen meglátogatjuk.
2. Ha a jármű első célpontja a legtávolabbi pont, a szállítás legköltséghatékonyabb módja az, ha üresen teszi meg a jármű a zónához vezető utat, így minimalizálva a jármű súlyát és fogyasztását.
3. Ha a legtávolabbi zóna kiürült, és a járműnek még van némi tárolókapacitása, akkor a zónából a WtE-üzembe való visszaúton más zónákat is elláthat. Mivel a visszavezető útvonalat mindenképpen meg kell tenni, a második zóna ellátása által okozott kisebb kitérő csak kis mértékben növeli a teljes utazási távolságot. Ezt a módszert nevezhetjük „trickle back ellátásnak”.
4. A trickle back ellátás csak akkor életképes, ha a meglátogatott zónák külső peremét ürít ki először a belső zónákhoz képest, logikai okokból: egyszerűen nem lehet hulladékot gyűjteni a visszaúton, ha az erőműhöz közelebbi zónákat már elsőként ellátták.

Miután a hulladékot a legtávolabbi zónában összegyűjtötték, az algoritmus elemzi, hogy maradt-e még tárolókapacitás a járműben. Ha a válasz igen, akkor a visszautazás során keres egy másik zónát, ahová szállíthat. Az optimális ellátandó zóna megtalálása érdekében másodszor egy keresési sugarat alkalmazó módszert dolgoztunk ki. Először is, a jármű jelenlegi helye és a fenti ábrán zöld színnel jelölt erőmű helye között egy légvonalbeli egyenest határozunk meg. Másodszor, az egyenesre merőleges vektorpár kerül meghatározásra. E vektorok hossza jelzi a keresési sugár végét egy adott pillanatban. Maga a keresési sugár egy téglalap, amelyet a légvonal és a vektorok hossza határoz meg. A vektorok hossza ciklikusan növekszik 0,01°-kal Budapest szélességi fokán mérve, ami 75,124 km/1°-nak felel meg. A keresési vektorok maximális hosszát az aktuális jármű és az erőmű közötti távolság harmadára állítottuk be. Ez csak egy kezdeti érték volt, amelyet később optimalizáltunk, az eredmények az Eredmények szekcióban láthatók. Minden egyes ciklussal a vektorok hossza a maximális határértékig növekedett, és e ciklusok során az algoritmus a következő szempontok alapján elemezte a csúcspontokat:

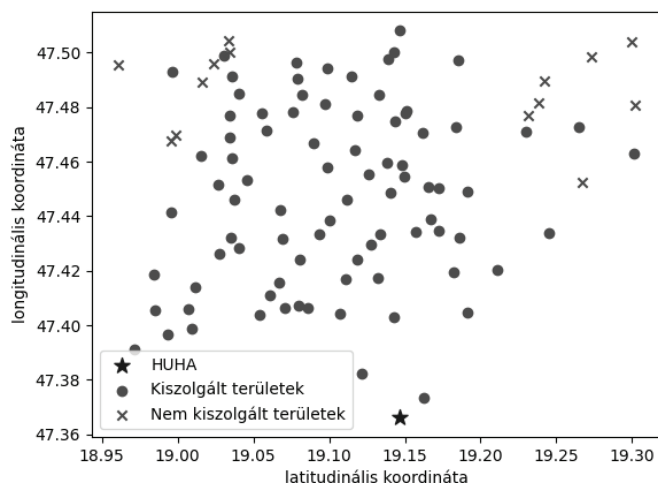
- amelyik zóna csúcspontja a sugárban belül helyezkedik el,
- a zóna MSW-tartalma,
- a második zóna ellátása miatt szükséges többlet távolság nagysága.

Ezen megfontolások alapján az algoritmus meghatározta az optimális csúcspontot, mint másodlagos célpontot. Ezt a lépést követően a hulladékgyűjtés a második célállomáson elkezdődik, és az algoritmus ismét elemzi, hogy a járműnek van-e szabad tárolókapacitása vagy sem. Ha a válasz igen, akkor a fent bemutatott módszerek alapján új keresési sugarat határoz meg, és új zónát lát el. Ez mindaddig folytatódik, amíg a jármű tárolókapacitása meg nem telik, vagy amíg a keresési körzetben belüli zónákban az összes szilárd hulladékot be nem gyűjtötték. Ha a tárolókapacitás betelt, a jármű visszatér az erőműbe, és az algoritmus elemzi a zónákban maradt szilárd hulladék mennyiségét. Ha van még begyűjtetlen hulladék, akkor egy új jármű indul el. Ellenkező esetben a program befejeződik.

Eredmények

Az ellátott zónák meghatározása

Amint azt korábban említettük, a WtE-üzem nem tudta felvenni a 100 azonosított zónában keletkező teljes hulladékmennyiséget, így szükségessé vált a lehető legjobb ellátandó zónák meghatározása. Emiatt egy algoritmust hoztunk létre, amelyet a Az ellátott zónák meghatározása című fejezetben részletezünk. Az algoritmus eredményei a 3. ábrán kerülnek bemutatásra. ábra.



3. ábra. Az ellátott zónák ábrázolása koordináta szerint

A fenti ábra a földrajzi koordináták alapján mutatja a zónák-zeppontok (csúcspontok) helyét. Az algoritmus által megfelelőnek ítélt zónákat zöld pontokkal jelöltük, míg a nem megfelelő zónákat piros kereszttel. A 100 zónából összesen 85 zónát sikerült ellátni. Megfigyelhető, hogy egyes ellátatlanul maradt zónák fizikailag közelebb helyezkednek el a WtE-erőműhöz (kék csillaggal jelölve), mint más ellátandó zónák. Ez a korábban, az Az ellátott zónák meghatározása-nál részletezett három feltétellel magyarázható, főként a következő kritériumokkal:

- ha egy zónát „megnyitottak” - a hulladékgyűjtés megkezdődött -, a zónát teljesen ki kell üríteni, nem maradhat benne szilárd hulladék nyoma,
- a WtE-üzem maximális kapacitását nem lehet túllépni.

Az érintetlenül hagyott zónákat nem látták el, mivel azok szilárd-hulladék-tartalma túl magas volt ahhoz, hogy az erőmű a számítás adott állapotában befogadja. Ennek eredményeképpen az algoritmus a távolabbi, kisebb MSW-tartalmú zónák ellátását választotta.

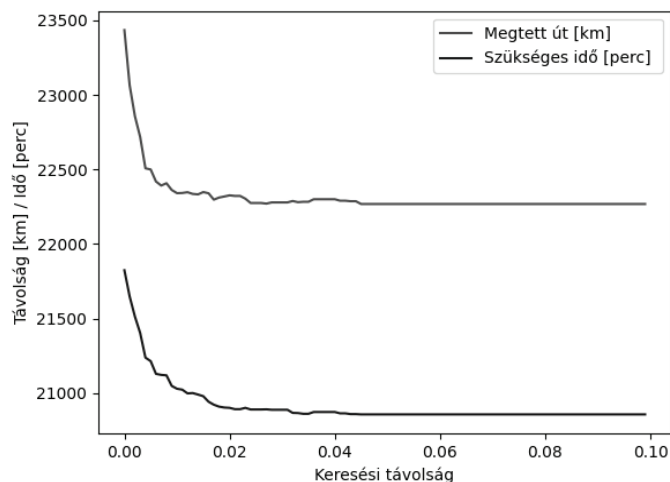
Keresési sugár optimalizálása

Korábban azt is említettük, hogy a keresési sugarat, amelyet a potenciálisan legközelebbi feltételezhető zóna meghatározásához használtunk, egy kezdeti értékkel, mint maximális keresési sugár szélességgel határoztuk meg. Ezt az értéket optimalizálni kellett a lehető legjobb távolság és üzemanyag-fogyasztáscsökkentési érték megtalálása érdekében. E cél elérése érdekében az optimalizáló algoritmust 150 alkalommal futtattuk le, miközben folyamatosan regisztráltuk az összes jármű által megtett teljes távolságot és a megtételéhez szükséges időt. Az algoritmust a következőképpen módosítottuk:

- a maximális keresési sugarat az első futtatáskor $r = 0$ -ra állítottuk be,

- és fokozatosan $0,001^\circ$ -kal növeltük minden egyes futtatási ciklusban.

A szimuláció eredményei a 4. ábrán láthatók.



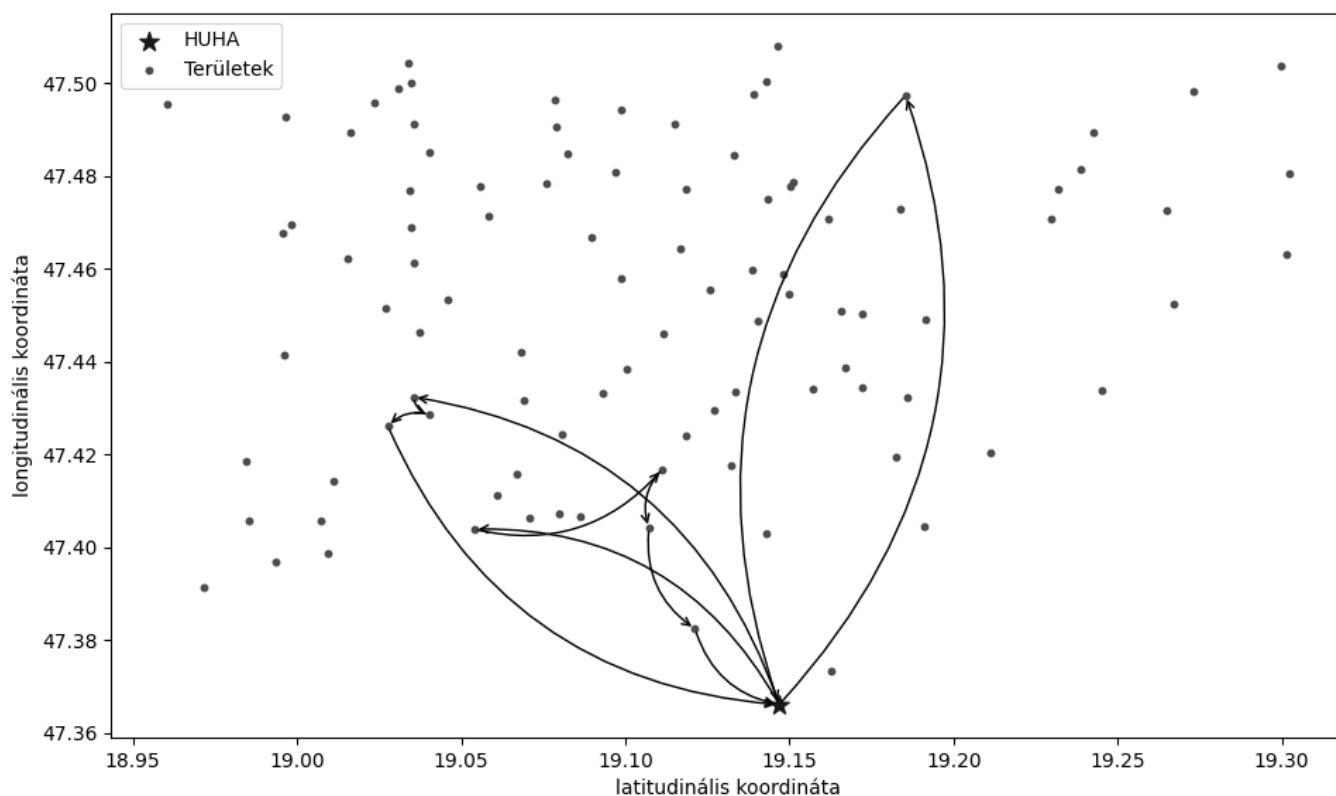
4. ábra. Az összes megtett távolság és a megtételhez szükséges időtartam ábrázolása a maximális keresési távolság függvényében

A piros grafikon a távolságot, míg a kék grafikon az időt mutatja. A grafikon elején tapasztalható meredek csökkenés a keresési sugár jelentőségével magyarázható, mivel a nulla szélesség azt jelenti, hogy nincs mód egy esetleges második ellátható zóna keresésére, tehát nincs keresési sugár. Megállapítható, hogy még egy kis keresési sugár szélessége is hatalmas hatással lehet a megtett távolság hosszára és a hozzá kapcsolódó időre. Nagyobb keresési sugárértékeknél fordított arányosság tapasztalható a sugár szélessége és a mért értékek között. A nagyobb szélesség az eredeti útvonalától távolabb eső zónaválasztási lehetőségeket biztosít, így csökken annak valószínűsége, hogy az algoritmus ezeket másodlagos gyűjtőpontként választja. Bizonyos számú lefutás után mindkét mért értékben stagnálás figyelhető meg.

Az optimális maximális keresési sugár értéke $r = 0,045^\circ$ lett. Elméletileg lehetne magasabb is, de ez nem változtatná meg a megtakarítások eredményét a stagnáló értékek miatt. Másrészt a számítási erőforrásigény gyorsan növekedne, ami az optimalizálási módszert rendkívül hatékonytalaná tenné.

Az útvonaloptimalizálás hatásai

Az optimális maximális keresési sugár szélességének ismeretében a programot úgy módosítottuk, hogy ezeknek az értékeknek megfelelően. Ebben a fejezetben az eredményeket a 5. ábrával kezdve részletezzük, amely egy kis betekintést nyújt az algoritmus belső működésébe. Az ábra szerkezete megegyezik a 3. ábrával, a pontok pedig a 100 meghatározott zónát jelölik. Az első futtatásnál egy egyszerű utazás - gyűjtés - visszavitel típusú szilárd hulladék-szállítás figyelhető meg. A második futtatás egy kissé bonyolultabb gyűjtési útvonalat mutat be, ahol a jármű egy zóna kiürítése után két további zónában keresi és gyűjti be a szilárd hulladékot, mielőtt visszatérne az erőműbe. A harmadik futás az algoritmus által készített legbonyolultabb útvonalként lett kézzel kiválasztva: az első zóna kiürítése után két további zónát ürített ki teljesen, és egy további zónában gyűjtött be hulladékot a WtE-erőműbe visszatérve. Ez a



5. ábra. Az algoritmus által meghatározott három hulladékgyűjtési útvonal vizualizációja

rendkívüli eset összesen 4 ellátott zónát eredményezett egyetlen futáson belül, mindezt minimális kitérőkkel.

A fent bemutatott három futás azonosítószámai a látogatás sorrendjében a következők:

- 1. futás: 1.0 → 16.0 → 1.0
- 2. futás: 1.0 → 159.0 → 181.0 → 14.0 → 1.0
- 3. futás: 1.0 → 34.0 → 56.0 → 145.0 → 10.0 → 1.0

Az algoritmust úgy építettük fel, hogy adatokat gyűjtsön a zónák közötti utazás során megtett távolságról, az ehhez szükséges időről, a zónákon belül megtett távolságról, az ezen adatok alapján megtett teljes távolságról, az utazások üzemanyag-fogyasztásáról és végül a szállítással kapcsolatos költségekről. Ez az adatkészlet a szimulációban jelen lévő minden járműre vonatkozóan rendelkezésre áll. Ezen információk mellett az algoritmus a programkód minőségének ellenőrzése érdekében adatokat gyűjtött az útvjáról visszatérő egyes járművek szabad kapacitására vonatkozóan is.

A végeredmény elérése érdekében a megtakarításokat a jelenlegi rendszerhez képest számítottuk ki. Az eredmények szerint havi 2 894 351 Ft potenciális megtakarítás érhető el, ami éves szinten 34 732 209 Ft megtakarításnak felel meg. Az optimalizálás a szilárd hulladékszállítás környezeti oldalára is hatással van, mivel a járművek szén-dioxid- és nitrogén-oxid-kibocsátása havonta 9459,6 kg-mal, illetve 45,3 kg-mal csökken. Ez az érték éves időtartamban is megjeleníthető, ami 113,5 tonna CO₂ és 543,6 kg NO_x kibocsátás elkerülését jelenti évente a fővárosban.

Irodalomjegyzék

- [1] Magyarország Nemzeti Atlasza: https://emna.hu/map/Bp_nep_sur_2011/@47.4663625,19.1274506,12.00z
- [2] Egy főre jutó éves hulladéktermelés Magyarországon:

<https://www.europarl.europa.eu/news/hu/headlines/society/20180328STO00751/hulladekkezeles-az-eu-ban-trendek-es-statisztikak-infografika>

- [3] Mercedes teherautók fogyasztása: http://www.linardos.gr/brochures/brochures.specific/brochures.chassis.cab.trucks/MERCEDES-BENZ/MERCEDES-BENZ_ECONIC.pdf
- [4] Előkészítő Tanulmány Rev.1. (S-6 Mérnök Kft, koordinátor: Orbán Tibor, 2017. augusztus)
- [5] Régi üzemanyag árak jegyzéke: https://net.jogtar.hu/getpdf?docid=000G0000.APE&targetdate=&printTitle=Adatt%C3%A1r&referer=http%3A//net.jogtar.hu/jr/gen/hjegy_doc.cgi%3Fdocid%3D000000003.TXT
- [6] Dízelmotor kibocsátási értékei: <https://adoc.pub/szakdolgozat-kipufogogazok-karos-emissziojanak-cskkentesere-.html>
- [7] Dízel üzemanyag kibocsátása: https://en.wikipedia.org/wiki/Diesel_exhaust

Köszönetnyilvánítás

A Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-2-I-BME-278 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

