

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

**Eseményvezérelt szimulációs
módszerek kidolgozása csővezeték
hálózatokban lévő termékek
szállításához**

Szerző:

Csontos Balázs

Témavezető:

Dr. Heckl István

Pannon Egyetem

Műszaki Informatikai Kar

Informatikai Tudományok Doktori Iskola

Veszprém

2024

1. Bevezetés

A 21. század elején az olajipar továbbra is meghatározó szerepet tölt be a globális gazdaságban. Az olajkitermeléssel és elosztással kapcsolatos folyamatok és rendszerek rendkívül összetettek, tőkeigényesek, ezért a legmodernebb technológiák használatát igénylik. Az olajipart általában három fő részre osztják: upstream, midstream és downstream. Az upstream a kőolaj feltárását és kitermelését, a midstream a kőolaj szállítását és tárolását, a downstream pedig a kőolaj különféle végtermékekké történő finomítását, valamint a végtermékek forgalmazását foglalja magában. A finomítás egy összetett feladat, amelyben a cél, hogy a kőolajat végtermékké alakítsák át. Ilyen végtermékek például a benzin, a kerozin, a sugárhajtómű üzemanyag, a gázolaj, a fűtőolajok, a kenőanyagok, a viaszok, az aszfalt, a földgáz, az autógáz (LPG), valamint több száz további petrokémiai termék.

Az olajtásaságok évről-évre egyre nagyobb figyelmet szentelnek az ütemezési problémák megoldására, hogy csökkentsék a költségeket. A vállalatoknak különféle üzemanyagokat és félkész termékeket kell a finomítókból az elosztó telephelyekre szállítani, hogy ott értékesítsék azokat a fogyasztóknak. A csővezetékes szállítás során, amikor egy új termék kerül a csőbe, az tovább nyomja a már a csőben lévő termékeket. Ebből következik, hogy egy termék szállítása az utána következő termékek nyomtatási műveleteitől függ. Cső elágazások esetén pontosan meg kell határozni, hogy mikor kell egy szelepet átállítani. A csövekben lévő termékek között nincs fizikai elválasztás, ezért a termékek a határfelületen keverednek egymással. Mivel a csövek átmérője nagyon kicsi a hosszukhoz képest, ezért az összekeveredett mennyiség kicsi. Az ütemezés szintjén ezért nem foglalkoznak a termékek keveredéssel. A keletkezett keveréket, vagy másnéven slopot, visszaszállítják a finomítóba.

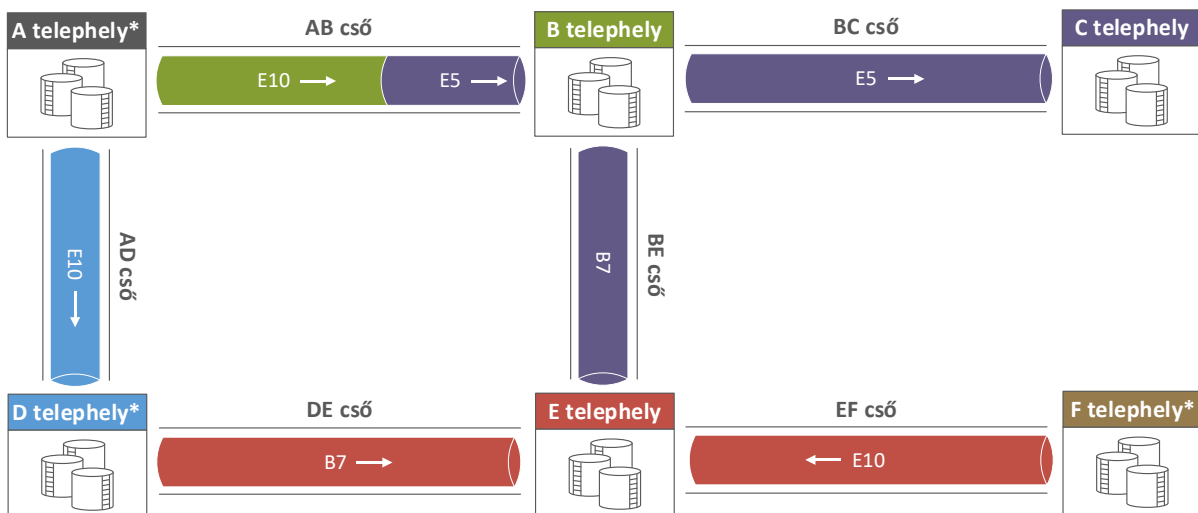
Az olajiparban az ütemezési problémák típusától függően használnak optimalizálást vagy szimulációt. Optimalizálást általában olyan működési problémák megoldására használják, ahol a probléma nem túl bonyolult. Például, minimalizálni szeretnék a szivattyútelepek leállítását, vagy az áramköltséget. Itt a sok megoldás közül szeretnék a legjobbat kiválasztani. Ezzel szemben a szimuláció egy konkrét megoldást vizsgál, megmutatja, hogy annak milyen az időbeli lefolyása. Például, ellenőrizni szeretnék egy ütemezési terv megvalósíthatóságát, vagy bizonyos szelepműveletek hatását.

A disszertációban bemutatott kutatási eredmények egy diszkrét eseményű szimulációs rendszeren alapulnak, amely képes rövid CPU-idő alatt ellenőrizni az ütemezési terv megvalósíthatóságát több forrásból álló, hálószerű csővezeték hálózatokon. Ha az ütemezési terv nem megvalósítható, akkor a módszer jelezi a probléma pontos okát és idejét az ütemezőnek. A modell továbbfejlesztett verziója lehetővé teszi az ütemezők számára egy csőben lévő termék útvonalmódosítását, kettéválasztását, a cső áramlási irányának megfordítását, valamint különböző tartályműveletek (keverés, szállító járműves feltöltés, tartályáttöltés) megvalósítását. A dolgozatban az alapértelmezett szigorú szimulációs mód mellett bemutatásra kerül egy új időeltolódásos szimulációs mód is, amely segítségével erőforrás foglaltság esetén, automatikusan eltolódnak a nyomtatási műveletek kezdési idői.

2. Problémadefiníció

2.1 Egy illusztrációs példa egy csőhálózat működésére

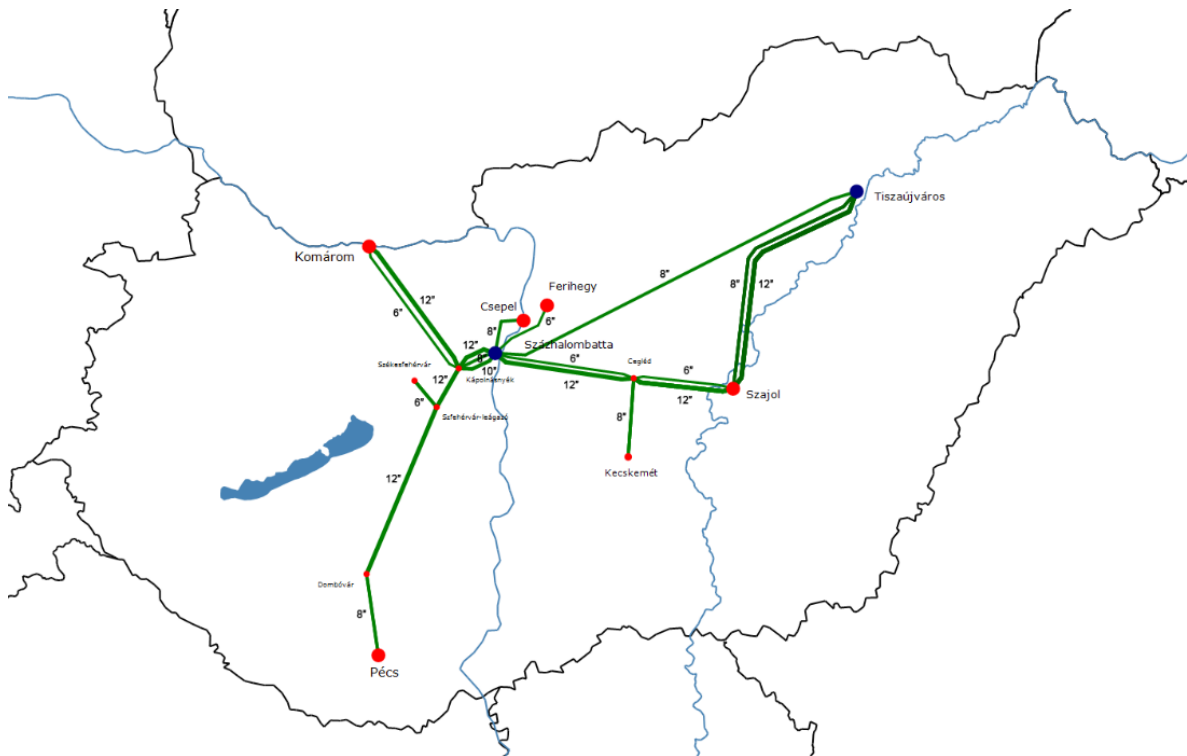
A termékvezeték-hálózatok három fő részből állnak: telephelyek, tartályok és csővezetékek. A telephelyek földrajzilag szétszórtan helyezkednek el. A telephelyek lehetnek finomítók és/vagy elosztó telephelyek. Minden telephelyen számos tartály található, amelyekben különböző termékeket tárolnak. A telephelyeket csővezetékek kötik össze, amelyekben folyékony termékeket szállítanak. Az 1. ábra egy egyszerű csővezetékrendszert mutat, amely E5 benzint (maximum 5% etanol), E10 benzint (maximum 10% etanol) és B7 gázolajat (maximum 7% biokomponens) tartalmaz. Az ábrán 6 telephely (A, B, C, D, E, F) látható, amelyeket csövek kötnek össze (AB, AD, BC, BE, DE, EF cső). A csillaggal jelölt telephelyeken nyomtatási művelet hajtanak végre. Egy csőben lévő termék színe, az adott termék céltelephelyét, a nyíl pedig a termék áramlási irányát mutatja, ha az aktuális cső használatban van. A csővezetékes szállítás csak akkor kezdhető meg, ha a forrástelephelyen elengedő mennyiségű termék áll rendelkezésre. A csővezeték kimenetén lévő termék egy telephelyre vagy egy másik csőbe fogadható ki. Egy termék útvonala azon csövek sorozata, amelyet a terméknek követnie kell. Például az AB csőben lévő E5 benzinnel végig kell haladnia az AB és BC csövön, hogy a C telephelyre kerüljön.



1. ábra. Szemléltető példa egyszerű csővezeték hálózatra.

2.2 Egy valós csőhálózat ismertetése

Az ütemezőknek a valóságban jóval összetettebb csővezeték-rendszerben kell ütemezési tervet létrehozniuk számos másodlagos tényezőt figyelembe véve. Erre jó példa a közép-európai olajipari vállalat, a MOL 1250 km hosszú magyarországi termékvezeték-hálózata, lásd 2. ábra. Az ábrán minden zöld vonal egy csövet, a kék pontok a finomítókat, a piros pontok pedig az elosztó telephelyeket jelölik. A termékvezetékek összesen 13 telephelyet köt össze, amelyből kettő finomító és elosztó telephely is egyben. A csövek átmérője 6" és 12" között van, a megengedett nyomás a teljes rendszerben 63 bar, és a kétirányú szállítás is megengedett. Az egyes vezetékek hossza 1,6 km és 130 km között van. A csővezetékek különféle üzemanyagokat és speciális termékeket (ásványi olaj, aromás anyagok, zsírsavmetil-észter stb.) szállítanak.



2. ábra. A MOL magyarországi termékvezeték-hálózata.

Kezdetben a MOL logisztikai csoportjának ütemezői csak rövid, maximum 3-4 napos gördülő ütemezést tudtak készíteni. Ennek oka a rendszer bonyolultsága. A vállalat célja a beérkezett telephelyi igények gyors kielégítése a készletek jelentős felhalmozása nélkül. A finomított termékek tartályokban tárolják, amelyek adott alsó és felső korlátokkal rendelkeznek. A csővezetékrendszer hálószerű, amely több kört is tartalmaz. A csövekben különféle termékek áramolnak, amelyek céltelephelye eltérő lehet. A termékek irányításához az elágazásoknál lévő szelepeket megfelelő módon kell beállítani. Egy csőben lévő termék akkor tud elmozdulni, ha a cső elejére egy terméket pumpálnak be (nyomatás). Előfordulhat, hogy egy olyan terméket nyomatnak a csőbe, amely nem egy telephelyi igényt elégít ki, hanem egy már csőben lévő termék kifogadását teszi lehetővé a céltelephelyen. Egyes esetekben a csövekben lévő termékek céltelephelye módosítható akár úgy is, hogy a cső kezdeti áramlási iránya megfordításra kerül. Ha az ütemező túl korán, vagy túl későn ütemez be egy nyomatási műveletet, akkor az különböző problémákat generálhat, például egy használni kívánt csövet egy másik nyomatási művelet foglalja, vagy nincs megfelelő szabad tartálykapacitás a céltelephelyen.

2.3 A csőhálózat működésének leírása

A szimulációs modellben a következő feltételezéseket és korlátokat kell figyelembe venni:

- A csőhálózat egy tetszőleges gráf, amely köröket is tartalmazhat.
- A termékek gyártása több telephelyen is történhet, az igény bármely telephelyről kiszolgálható.
- A szimulátor az időhorizontot egyperces időintervallumokra osztja. Mivel a telephelyeken lévő fizikai műveletek (pl. a megfelelő szelepek beállítása) végrehajtásának is ilyen nagyságrendű a végrehajtási ideje, ezért nincs értelme rövidebb időközöknek.

- Minden időintervallumra meg kell határozni a rendszer teljes állapotát, vagyis az összes tartályszintet, a csövekben lévő termékek elhelyezkedését, valamint a csőelágazásokban lévő szelepek állapotát.
- A szimulációs modell kezdeti verziójában a csövekben lévő nyomtatásoknak a korábban meghatározott céltelephelyre kellett szállítani. Előfordulhat azonban egy olyan váratlan esemény (pl. egy csőtörés), amely szükségessé teszi egy csőben lévő termék céljának módosítását. A végleges szimulációs modellben az ütemező már ketté tud választani egy már csőben lévő terméket. Ehhez a művelethez szükség van a kettéosztás időpontjára, a csőazonosítóra, a termék sorszámára és mennyiségére. A kettéválasztás mellett útvonalmódosításra is van lehetőség. A művelet segítségével az ütemező egy adott időpontban módosíthatja a csőben lévő termék útvonalát és/vagy áramlási irányát.
- Egy csővezetékben lévő termék egy tartályba vagy egy másik csőbe irányítható. A modell jelenleg nem kezeli a részleges szállítást (egy nyomtatás egy része a tartályba másik része egy csőbe kerül irányításra).
- Egy telephelyen egyszerre több csőművelet is történhet, ha a helyi erőforrások (pl. szabad szivattyú kapacitás) megengedik.
- Az ütemezési terveket a csőoperátorok készítik, és a szimulációs modell ezt a tervet ellenőrzi.
- Egy ütemezési terv készítésekor az ütemezők figyelembe veszik a telephelyeken lévő készleteket, valamint a jövőbeli termelést.
- Az ütemezők általában preferált útvonalakon (előre meghatározott csősorrend és áramlási irány) keresztül szállítják a termékeket, de ettől eltérhetnek.
- Az ütemezési tervet az ütemezők úgy próbálják megvalósítani, hogy a csőben lévő egymást követő termékek típusa kompatibilis legyen egymással. Például, egy fajta benzin után egy másik fajta benzin következzen, ha lehetséges.
- Az ütemezők nem veszik figyelembe a szivattyúzás költségeit.
- Az ütemezők nem veszik figyelembe a domborzat sajátosságait, mivel a csövek hosszához képest ez csak minimális többlet keveredéssel jár.
- A szállítási feladatoknak egy előre meghatározott időhorizonton belül kell megvalósulniuk.
- A csövekben lévő termékek megállhatnak. A csőhálózat egyes szakaszai használhatók tárolóként is.
- A szimulációban a gyártás (keverés) kötegetelt módon történik. Keverési művelet közben a tartály zárva van, ezért nem használható le- és feltöltési műveletekhez. A keverési művelet létrehozásával az ütemező meghatározza a kezdés időpontját, a tartály és a telephely azonosítóját, a termék azonosítóját és mennyiségét, valamint a keverés sebességét. A keverési művelet befejezése után a tartály elérhetővé válik a kevert termék mennyiségével.
- A csővezetékkel összekötött elosztó telephelyekről a termék megfelelő szállító jármű segítségével kerül elszállításra a megrendelőhöz. Közúti tartálykocsi kiszolgálás csak a telephely nyitvatartási idején belül történhet meg.
- Telephelyen belüli tartályáttöltés csak azonos típusú termékek esetén valósulhat meg.

2.4 A cél megfogalmazása

A MOL vezetése megbízható 30 napos hosszú ütemezést tűzte ki célul, ezért a vállalat logisztikai csoportja megpróbált olyan kereskedelmi forgalomban kapható szimulációs szoftvert találni, amely képes az ütemezési tervek validációjára. Az előzetes tesztelés során azonban kiderült, hogy a

szimulációs szoftver nem volt képes teljes mértékben figyelembe venni a MOL működési jellemzőit. Ezt követően a vállalat arra a következtetésre jutott, hogy egyedi szimulációs szoftverre van szükség. A MOL megkeresésére kezdtünk el dolgozni egy ütemezési terv megvalósíthatóságát validáló szimulátoron.

3. Új tudományos eredmények

Az értekezés új tudományos eredményeinek tézisszerű összefoglalása:

- 1. Kidolgoztam egy eseményvezérelt szimulációs módszert a termékszállítás ütemezések ellenőrzéséhez többtermékes hálószerű csőhálózatokban. [1], [2], [4], [5], [6]**
 - a. Lefektettem a csővezetékes termékszállítás-ütemezés szimulációs alapjait. Definiáltam a rendszert működtető eseményeket és azok viselkedését.
 - b. Létrehoztam egy szimulációs szoftvert a szimulációs eljárás működésének teszteléséhez.
 - c. Az eseményvezérelt szimuláció működését egy valós példán keresztül mutattam be.
- 2. Időeltolós eseményvezérelt módszert dolgoztam ki a hibás termékszállítás ütemezések automatizált javításához többtermékes hálószerű csőhálózatokban. [3], [7]**
 - a. Létrehoztam egy hibajavító eljárást a nem megvalósítható ütemezési tervekhez.
 - b. Továbbfejlesztettem egy szimulációs szoftvert az időeltolós szimulációs eljárás működésének teszteléséhez.
 - c. Definiáltam három működési esetet az időeltolás szimulációs módszer bemutatására: ha foglalt vagy üres a forrástartály, ha foglalt a cső, ha foglalt vagy tele van a céltartály.
 - d. Rámutattam a szakaszos végrehajtásánál bekövetkező termékfeldarabolódás problémájára.
- 3. Továbbfejlesztettem az eseményvezérelt szimulációs módszert a csővezetékekben lévő termékek útvonalmódosításához és szelepműveletek meghatározásához. [3], [7]**
 - a. Kidolgoztam egy szimulációs módszert, amely segítségével a csőben lévő termékek útvonala, valamint áramlási iránya módosítható.
 - b. Megvalósítottam egy szimulációs eljárást, amely segítségével kettéválasztható egy csőben lévő termék. Ez lehetővé teszi, hogy az egyes részek eltérő céltelephelyeken kerüljenek kifogadásra.
 - c. Kidolgoztam két visszatérési stratégiát a csövekben lévő termékek automatizált útvonalmódosításához.
 - d. Megvalósítottam egy módszert, amely a szelepműveleteket határozza meg.

4. Az új tudományos eredmények hasznosítása

A dolgozatban bemutatott diszkrét eseményű szimulációs rendszer jelentős segítséget biztosít a MOL termékütemezői számára. A szimulátor képes rövid CPU-idő alatt ellenőrizni az ütemezési terv megvalósíthatóságát több forrásból álló, hálószerű csővezeték hálózatokon. Ha az ütemezési terv nem megvalósítható, akkor a módszer jelezi a probléma pontos okát és idejét az ütemezőnek. A modell továbbfejlesztett verziója lehetővé teszi az ütemezők számára egy csőben lévő termék útvonalmódosítását, kettéválasztását, a cső áramlási irányának megfordítását, valamint különböző tartályműveletek (keverés, szállító járműves feltöltés, tartályáttöltés) megvalósítását. A megvalósított

szimulációs módszer bármilyen olajipari csőhálózat esetén használható. A MOL esetén ez különösen fontos, hiszen a cél a külföldi leányvállalatok csőhálózatainak összekötése a magyarországi csőhálózattal.

5. Tudományos közlemények

A szerző MTM profilja a következő hivatkozáson keresztül érhető el: <https://m2.mtmt.hu/gui2/?type=authors&mode=browse&sel=10064020>

5.1 Az értékezés témaköréből készült publikációk

Nemzetközi folyóiratcikkek

- [1] **Csontos B.**, Halász L., Heckl I., „Event-driven simulation of liquid transportation through pipeline networks for oil companies”, Chemical Engineering Transactions, 70. évf., 1741-1746 old., 2018.
- [2] **Csontos B.**, Halász L., Heckl I., „Event-driven simulation method for fuel transport in a mesh-like pipeline network”, Computer & Chemical Engineering, 157. évf., 107611, 2022, **IF: 4.3.**
- [3] **Csontos B.**, Halász L., Heckl I., „Improved event-driven simulation method for fuel transport in a mesh-like pipeline network”, Computer & Chemical Engineering, 168. évf., 108066, 2022, **IF: 4.3.**

Nemzetközi konferencia-kiadványokban megjelent közlemények

- [4] **Csontos B.**, Heckl I., „Simulation models for transporting oil materials in pipelines”, Proceedings of the Pannonian Conference on Advances in Information Technology (PCIT'2019), 1. évf., 139-144 old., 2019.

Nemzetközi konferencia előadások

- [5] **Csontos B.**, Heckl I., „Simulation models for transporting oil materials in pipelines”, PRES 2018 (21st Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction), Prága, Csehország, 2018.
- [6] **Csontos B.**, Heckl I., „Simulation models for transporting oil materials in pipelines”, Pannonian Conference on Advances in Information Technology (PCIT'2019), Veszprém, Magyarország, 2019.
- [7] **Csontos B.**, Heckl I., „Custom simulator for validating pipeline schedule in the oil industry”, EDSI 2022 - EDSI 12th Annual Meeting, Dublin, Írország, 2022.

5.2 Egyéb témakörből készült publikációk

Nemzetközi folyóiratcikkek

- [8] **B. Csontos**, I. Heckl, „Accessibility, usability, and security evaluation of Hungarian government websites”, Universal Access in the Information Society, 20. évf., 139-156 old., 2021, **IF: 2.8.**

- [9] **B. Csontos**, I. Heckl, „Improving accessibility of CMS-based websites using automated methods”, Universal Access in the Information Society, 21. évf., 491-505 old., 2022, **IF: 2.8**.

Hazai konferencia-kiadványokban megjelent közlemények

- [10] **B. Csontos**, I. Heckl, „A magyar közszerbeli weboldalak használhatóságának, akadálymentesítésének és biztonságának vizsgálata”, Orvosi Informatika 2018. A XXXI. Neumann Kollokvium konferencia-kiadványa, Szeged, Magyarország, 31. évf., 74-79 old., 2018.
- [11] **B. Csontos**, I. Heckl, „Akadálymentesítő módszerek a tartalomkezelő rendszerekhez”, Orvosi informatika 2019. A XXXII. Neumann Kollokvium konferencia-kiadványa, Veszprém, Magyarország, 32. évf., 30-35 old., 2019.
- [12] **B. Csontos**, I. Heckl, „Akadálymentesítő módszer megvalósítása a WordPress Gutenberg blokk szerkesztőhöz”, Orvosi informatika 2020. A XXXIII. Neumann Kollokvium konferencia-kiadványa, Szeged, Magyarország, 33. évf., 62-67 old., 2020.