

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS

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

Szerző:

Csontos Balázs

DOI:10.18136/PE.2025.915

Témavezető:

Dr. Heckl István

Pannon Egyetem

Műszaki Informatikai Kar

Informatikai Tudományok Doktori Iskola

Veszprém

2024

Eseményvezérelt szimulációs módszerek kidolgozása csővezeték hálózatokban lévő termékek szállításához

Az értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében készült a Pannon Egyetem Informatikai
Tudományok Doktori Iskolája keretében

informatikai tudományok tudományágban

Írta: Csontos Balázs

Témavezető: Dr. Heckl István

Elfogadásra javasolom (igen / nem)

.....
Dr. Heckl István
(témavezető)

Az értekezést bírálóként elfogadásra javasolom:

Bíráló neve: igen /nem

.....
(bíráló)

Bíráló neve: igen /nem

.....
(bíráló)

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján%-ot ért el.

Veszprém,

.....
(a Bíráló Bizottság elnöke)

A doktori (PhD) oklevél minősítése

Veszprém,

.....
(az EDHT elnöke)

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	i
Köszönetnyilvánítás.....	iii
Kivonat	iv
Abstract	v
Abstrakt.....	vi
1. Bevezetés.....	1
2. Szakirodalmi áttekintés	3
2.1 Csővezetékes ütemezés	3
2.1.1 Ütemezés egyenes csővezetékben.....	3
2.1.2 Ütemezés fa és hálószerű csővezeték hálózatokban	6
2.2 Az ütemezési terv szimulációja	9
3. Problémadefiníció	13
3.1 Illusztrációs példa egy csőhálózat működésére	13
3.2 Egy valós csőhálózat ismertetése.....	13
3.3 A csőhálózat működésének leírása	14
3.4 A cél megfogalmazása.....	16
4. A diszkrét-eseményű szimulációs modell felépítése	17
4.1 Erőforrások.....	17
4.1.1 Telephelyek	17
4.1.2 Tartályok.....	17
4.1.3 Csövek és csőhálózatok	18
4.2 Ütemezési terv	19
4.3 Események	20
4.4 A cső működése	21
5. Szimulációs módszerek csővezetékes ütemezéshez	22
5.1 Szigorú szimuláció	22
5.1.1 Alapvető szabályok.....	22
5.1.2 Szimuláció folyamata.....	23
5.1.3 Szimulációs eljárás bemutatása gyakorlati példákon keresztül	25
5.2 Időeltolós szimuláció	32
5.2.1 Eltérések a szimulációs folyamatok között.....	33
5.2.2 Nyomatási műveletek eltolásának bemutatása példával.....	33
5.2.3 Nyomatási műveletek szakaszos végrehajtásának bemutatása.....	38
5.2.4 Az időeltolós szimuláció korlátjainak bemutatása	40
6. A szimulációs modell továbbfejlesztése	42
6.1 Útvonalmódosítás	42
6.1.1 Termékek modellezése a csövekben	42
6.1.2 Kézi útvonalmódosítás.....	43
6.1.3 Automatizált útvonalmódosítás	48
6.1.4 Az útvonalmódosítás nehézsége	50
6.2 Szelepműveletek	51
6.2.1 Az utolsó két termék mindegyike az aktuális cső végén kerül kifogadásra.....	52

6.2.2	Az utolsó két termék egyike az aktuális cső végén kerül kifogadásra	52
6.2.3	Az utolsó két termék útvonalában lévő következő cső megegyezik	53
6.2.4	Az utolsó két termék útvonalában lévő következő cső különböző	53
6.3	Tartálműveletek	54
6.3.1	Finomító termékgyártás	54
6.3.2	Szállító járműves feltöltés	55
6.3.3	Telephelyen belüli tartályáttöltés	55
7.	Numerikus eredmények	57
7.1	A szimulátor számítási eredményei	57
7.2	A szimulátor eredményeinek bemutatása egy valós példán keresztül	57
8.	Összefoglalás	63
9.	Új tudományos eredmények	64
9.1	Tézisek	64
9.2	Az értekezés témaköréből készült publikációk	64
	Irodalomjegyzék	66

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik lehetővé tették, hogy ez a dolgozat elkészüljön. Elsősorban témavezetőmnek, Dr. Heckl Istvánnak tartozom köszönettel, aki éveken át irányította a munkámat és értékes tanácsokkal látott el. Köszönöm Halász Lászlónak, akinek szakmai tanácsai nagyban segítettek a kutatói munkámat. Továbbá szeretnék köszönetet mondani kollégáimnak a Rendszer- és Számítástudományi Tanszéken, akik hozzájárultak a munkám elvégzéséhez, valamint a családomnak a kitartó biztatásért.

Kivonat

Egy olajtársaság egyik fő feladata a telephelyi igények kielégítése. Mivel nem minden telephelyen történik gyártás, így elengedhetetlen a telephelyek közötti termékszállítás. A folyékony termékek szállítása preferáltan csővezetékek segítségével történik. Egy termék egy nyomatási művelet során kerül be a csőbe. A nyomatási műveletek sorrendjét és végrehajtási idejét az ütemezési terv határozza meg. Az ütemezési terv tartalmazza a szállítandó termék típusát és mennyiségét, a szállítások kezdetét, valamint az útvonalakat. Egy ütemezési terv, akkor megvalósítható, ha nem tartalmaz ellentmondásokat. Valós, több forrásból álló, hálószerű csővezetékhalozatokban egy hónapos ütemezési terv ellenőrzése komplex feladat, amelynek manuális létrehozása szinte lehetetlen. A komplex ütemezési tervek ellenőrzésének egyik módszere egy diszkrét eseményű szimulációs rendszer használata.

Kutatásaim során kidolgoztam egy esemény vezérelt szimulációs modellt a csővezetékes termék szállítás ütemezésének ellenőrzéséhez. A modellben bemutattam a diszkrét eseményű szimuláció alapjait, valamint kidolgoztam a rendszert működtető eseményeket és azok viselkedését. Ezt követően létrehoztam egy szimulációs szoftvert a javasolt modell implementálására. A modell működését valós példán keresztül mutattam be.

Kidolgoztam egy esemény vezérelt módszert a csővezetékes termékszállításban lévő nyomatási műveletek időeltolódásos ütemezéséhez. Továbbfejlesztettem a korábban megvalósított szimulációs szoftvert úgy, hogy az képes legyen az időeltolódásos szimulációs eljárás végrehajtására. Definiáltam három működési esetet az időeltolódásos szimulációs módszer bemutatására. Rámutattam a nyomatási műveletek szakaszos végrehajtásánál felmerülő nehézségekre.

Megvalósítottam egy szimulációs módszert, amely segítségével a csőben lévő termékek útvonala, valamint áramlási iránya módosítható. Létrehoztam egy szimulációs eljárást, amely segítségével kettéválasztható egy csőben levő termék úgy, hogy az egyes részek eltérő céltelephelyen kerülnek kifogadásra. Kidolgoztam két visszatérési stratégiát a csövekben lévő termékek automatizált útvonalmódosításához.

Abstract

One of the main tasks of an oil company is to fulfill the demands of the sites. Since production does not take place at all sites, product delivery between sites is essential. Liquid products are preferably transported using pipelines. A product is loaded into the pipe during a pumping operation. The sequence and execution time of the pumping operations is determined by the scheduling plan. The scheduling plan includes the type and quantity of the product to be delivered, the start of the deliveries, and the routes. A scheduling plan is feasible if it does not contain contradictions. In a real-world, multi-source, mesh-like pipeline networks, checking a one-month scheduling plan is a complex task that is almost impossible to carry out manually. One method of validating complex scheduling plans is to use a discrete-event simulation system.

During my research, I developed an event-driven simulation model to verify product pipeline delivery schedules. In the model, I presented the basics of discrete event simulation, as well as developed the events that operate the system and their behavior. After that, I created a simulation software to implement the proposed model. I presented the operation of the model through a real-world example.

I developed an event-driven method for time-shifted scheduling of pumping operations in pipeline product transport. I have improved the previously implemented simulation software so that it is able to perform the time-shift simulation procedure. I defined three operating cases to demonstrate the time-shifted simulation method. I have pointed out the difficulties encountered in the batch execution of pumping operations.

I implemented a simulation method, which can be used to change the route and flow direction of the products in the pipe. I have created a simulation procedure, which can be used to split a product in a pipe so that the individual parts are received at different destination sites. I have developed two return strategies for automated rerouting of products in pipes.

Abstrakt

Eine der Hauptaufgaben eines Ölunternehmens besteht darin, die Anforderungen der Standorte zu erfüllen. Da nicht an allen Standorten produziert wird, ist die Produktlieferung zwischen den Standorten unerlässlich. Flüssige Produkte werden vorzugsweise über Pipelines transportiert. Ein Produkt wird während eines Pumpvorgangs in die Leitung eingespeist. Die Reihenfolge und die Ausführungszeit der Pumpvorgänge werden durch den Zeitplan bestimmt. Der Zeitplan umfasst die Art und Menge des zu liefernden Produkts, den Beginn der Lieferungen und die Routen. Ein Zeitplan ist machbar, wenn er keine Widersprüche enthält. In einem realen, netzartigen Pipeline-Netzwerk mit mehreren Quellen ist die Überprüfung eines einmonatigen Zeitplans eine komplexe Aufgabe, die manuell fast unmöglich durchzuführen ist. Eine Methode zur Validierung komplexer Zeitpläne ist die Verwendung eines diskreten Ereignissimulationssystems.

Während meiner Forschung entwickelte ich ein ereignisgesteuertes Simulationsmodell zur Überprüfung von Lieferplänen für Produktpipelines. Im Modell stellte ich die Grundlagen der diskreten Ereignissimulation vor und entwickelte die Ereignisse, die das System betreiben, sowie deren Verhalten. Danach erstellte ich eine Simulationssoftware zur Implementierung des vorgeschlagenen Modells. Ich habe die Funktionsweise des Modells anhand eines realen Beispiels vorgestellt.

Ich habe eine ereignisgesteuerte Methode zur zeitversetzten Planung von Pumpvorgängen im Pipeline-Produkttransport entwickelt. Ich habe die zuvor implementierte Simulationssoftware so verbessert, dass sie das zeitversetzte Simulationsverfahren durchführen kann. Ich habe drei Betriebsfälle definiert, um die zeitversetzte Simulationsmethode zu demonstrieren. Ich habe auf die Schwierigkeiten hingewiesen, die bei der Batch-Ausführung von Pumpvorgängen auftreten können.

Ich habe eine Simulationsmethode implementiert, mit der die Route und die Fließrichtung der Produkte in der Leitung geändert werden können. Ich habe ein Simulationsverfahren erstellt, mit dem ein Produkt in einer Leitung aufgeteilt werden kann, sodass die einzelnen Teile an unterschiedlichen Zielorten empfangen werden können. Ich habe zwei Rückgabestrategien für die automatische Umleitung von Produkten in Leitungen entwickelt.

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 sugárhatómű 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 [1] 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 tartálműveletek (keverés, szállító járműves feltöltés, tartályáttöltés) megvalósítását. A dolgozatban az alapértelmezett szigorú szimulációs mód mellett bemutatásra kerül egy új időeltolós szimulációs mód is, amely segítségével erőforrás foglaltság esetén, automatikusan eltolódnak a nyomtatási műveletek kezdési idői.

A disszertáció további része a következőképpen épül fel. A 2. fejezet az olajipari csővezeték ütemezés témájához kapcsolódó szakirodalmat tekinti át. A 3. fejezet bemutatja a csőhálózatok működését, valamint ismerteti a problémát és a célt. A 4. fejezet a szimulációs modell elemeit mutatja be. Az 5. fejezet ismerteti a szigorú és az időeltolós szimuláció működését, míg a 6. fejezet a

csövekben lévő termékek útvonalmódosítását, a szelepműveleteket, valamint a tartálműveletek tárgyalja. A 7. fejezet összefoglalja a numerikus eredményeket. A 8. fejezet tartalmazza az összefoglalást, míg a 9. fejezet a dolgozat új tudományos eredményeit ismerteti.

2. Szakirodalmi áttekintés

Egy ütemezés meghatározza, hogy mikor mit kell végrehajtani. Ütemezést számos területen alkalmaznak. A projektmenedzsmentben az ütemterv a projekt mérföldköveinek, tevékenységeinek és teljesítésének listája. Általában minden feladathoz meghatározzák a függőségeket és az erőforrásokat, majd a kezdési és befejezési dátumokat az erőforrás-elosztás, a költségvetés, a feladat időtartama és az ütemezett események alapján becsülik meg. Az ütemezést általában a projektmenedzsment projekttervezési és projektportfólió-kezelési részeiben használják. Munkahelyi időbeosztás esetén az ütemterv meghatározza, hogy melyik dolgozónak mikor kell elvégezni egy adott munkát. Gyártási folyamatokban az ütemezés az egyes feladatok végrehajtási idejét, illetve sorrendjét határozza meg. A gyártási folyamatokban az ütemezés célja a gyártási idő és a költségek minimalizálása.

2.1 Csővezetékes ütemezés

Az olajiparban a csővezetékes ütemezés a telephelyi igények kiszolgálásának folyamata. Egy ütemezési tervben kerül meghatározásra, hogy mikor, honnan, és milyen termék kerüljön nyomtatásra a csőbe. Az ütemezés célja a telephelyi rendelkezésre állás biztosítása a telephelyen lévő tartálykészletek minimalizálása mellett. A csővezetékes ütemezés összetett feladat, mivel az ütemezés során számos korlátozást kell figyelembe venni. Az idő előrehaladtával egyre pontosabb megközelítések kerültek kifejlesztésre egyre bonyolultabb csőhálózatokhoz. Ezeket a megközelítéseket egyrészt csoportosítani lehet az alkalmazott módszer alapján: tudásalapú heurisztikus technikák [2], szigorú optimalizálási modellek [3], [4], [5], [6], dekompozíciós keretrendszerek [7], [8], [9], diszkrét eseményű szimuláció [10], [11], [12], [1], és kényszerprogramozás [13]. A szigorú optimalizálási modellek legtöbbször Mixed Integer Linear Programming (MILP) vagy Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP) matematikai modellekből állnak. Attól függően, hogy a mennyiségeket és az időintervallumokat hogyan kezeljük, megkülönböztethetünk diszkrét és folytonos modelleket. Másrészt csoportosítani lehet az ütemezési módszereket a csővezetékek strukturális felépítése alapján: egyenes, fa, hálószerű.

2.1.1 Ütemezés egyenes csővezetékben

Rejowski és Pinto [4] munkájában a rendszer egy olajfinomítóból és egy többtermékes csővezetékéből áll, amelyhez több telephely csatlakozik. A finomító és a telephelyek közötti távolság nagy, továbbá az energiaköltségek időszakos emelkedése miatt a csővezeték csak szakaszosan működik. A telephelyek között a csővezeték különböző szakaszokra van felosztva. A szakaszok egy termék felosztott részeit tartalmazzák. A szerzők az ütemezési rendszerhez olyan vegyes egészértékű lineáris programozási optimalizálási modelleket javasoltak, amelyek lineáris diszjunkciókból állnak diszkrét időben. Az első modellben azt feltételezték, hogy a csővezeték egyenlő részekre van felosztva, míg a második modellben már enyhítették ezt a megkötést. A modell kulcsfontosságú döntései közé tartoznak a tartályok és a csővezeték betöltési és kifogadási műveletei. A modellek eleget tesznek az összes működési korlátnak, mint például az anyagmérlegeknek, az elosztási korlátoknak, a termékigényeknek, a sorrendi korlátoknak és a csővezeték működésére vonatkozó logikai korlátoknak. A kapott eredmények magukban foglalják a telephelyi készleteket, a termékek elosztását a telephelyek között, valamint a legjobb terméksorrendet a csövekben. Később Rejowski és Pinto [5] általánosította és hatékonyabbá tette az előzőleg bemutatott MILP modellt [4]. A szerzők speciális korlátokat adtak

az eredeti modellhez, amelyek segítségével minimalizálták a termékszennyeződést a csőszakaszokban. A módosított modellt három eltérő ütemezési tervben vizsgálták. A kapott eredményekből kiderült, hogy az új speciális megkötések segítségével a modell hatékonyabban találja meg az optimális megoldást közel 70%-kal kisebb CPU-idő mellett. Fontos azonban megemlíteni, hogy az új megkötések növelik a szivattyúzási költségeket, mivel két termék találkozásánál a modell a keveredés minimalizálására törekszik. Ezen túlmenően a telephelyi készletköltségek is megnövekedtek, különösen alacsony kereslet esetén. Rejowski és Pinto [14] egy továbbfejlesztett folytonos idejű MINLP modellt mutattak be, amely már figyelembe vette az eltérő csővezeték átmérőkből keletkező áramlási sebesség változásokat. A szerzők korábbi MILP modelljéhez [5] képest egy sokkal hatékonyabb csővezeték ütemezés vált elérhetővé alacsonyabb számítási kapacitás mellett.

Cafaro és Cerdá [15] egy folytonos MILP modellt mutattak be egy finomítóval rendelkező csővezeték-hálózat ütemezéséhez. A modell meghatározza a terméksorok optimális sorrendjét, a szivattyúk sebességét, a kezdési és befejezési időpontokat, valamint a telephelyekre szállított termék mennyiségét. A modell újdonsága, hogy nem diszkrétizálja az időt, valamint, hogy nem osztja fel a csővezeték egytermékes részekre. Egy szigorúbb problémaábrázolás kidolgozásával jelentősen javult a csővezeték ütemezés minősége. A bináris változók számának jelentős csökkentésével csökkent a CPU-idő is úgy, hogy a szerzők jobb megoldásokat találtak, mint a korábbi munkákban bemutatott modellek használata esetén. Cafaro és Cerdá [16] egyik későbbi munkájában egy olajfinomítót és egy egyedi telephelyet összekötő csővezeték havi ütemezési problémájával foglalkozott. A szerzők által megvalósított folytonos idejű MILP modell képes meghatározni a csővezetékben lévő termékkötegek optimális sorrendjét és méretét, valamint nyomtatási műveletek végrehajtásának ütemezését. Ezen túlmenően a modell figyelembe veszi az ügyfelek napi rendszerességű termékigényeit, valamint a kulcsfontosságú telephelyi műveleteket, mint például a termékek minőségellenőrzését. Ez a modell sem igényli a csővezetékek felosztását egytermékes részekre, mivel képes folytonosan kezelni a csőben lévő termékmennyiségeket. A bemutatott MILP modell sokkal alacsonyabb számítási költséggel jobb folyamat ütemezést eredményezett, mint a korábbi megoldások.

Cafaro és Cerdá [17] és elsőik között dolgoztak ki egy folytonos idő- és mennyiség-alapú MILP-modellt, amely több finomítót és telephelyet is magába foglaló csővezeték hálózat ütemezésére használható. A szerzők olyan problémára kerestek megoldást, amelyben a nyomtatási műveleteket úgy kellett ütemezni, hogy a csővezeték teljes kapacitással működjön úgy, hogy a telephelyi igények időben ki legyenek elégítve minimális szivattyúzási költség és keveredés mellett. Mivel a modell alapját Cafaro és Cerdá korábbi modelljének [15] az általánosítása adta, amelyben egyetlen finomítói telephely volt összekötve több elosztó telephellyel, ezért az új modell is folytonos változókat használ mind a termékmennyiségekre, mind az időkre. Az egy finomítói telephellyel rendelkező modellektől eltérően a több finomító telephellyel rendelkező modellek esetén már meg kell határozni, hogy melyik telephelyről történik egy igény a kiszolgálása. Másik fontos különbség, hogy az új modell már lehetőséget biztosít nyomtatási műveletek végrehajtására köztes telephelyeken is. Ennek eredménye, hogy a csőben lévő termékek sorrendje nem feltétlenül lesz azonos a finomítói telephely nyomtatási sorrendjével. Fontos megemlíteni, hogy a köztes telephelyeken a csőbe nyomtatott termékek nem új termékként jelennek meg, hanem csak a csőben lévő termék méretét növelik. Később Cafaro és Cerdá [18] továbbfejlesztette az előző modelljét [17] úgy, hogy lehetővé tették az egy időben több telephelyről történő nyomtatási műveleteket. Korábban hasonló feladatoknál diszkrét dekompozíciós megközelítéseket alkalmaztak heurisztika-alapú döntéseken keresztül. A szerzők által kidolgozott folytonos MILP modell egyirányú csővezeték-hálózatok ütemezésére szolgál, ahol a cél az összköltség

minimalizálása. Az ütemezés a nyomtatási és szállítási műveleteket is figyelembe vette. A kapott eredmények azt mutatták, hogy az egyidejű szakaszos nyomtatási műveletek a csővezeték szállítási kapacitásának jobb kihasználásához és a telephelyi igények kielégítéséhez szükséges teljes idő jelentős csökkenéséhez vezettek.

Boschetto és társai [9] egy hierarchikus megközelítést javasoltak egy MILP modell és heurisztikák integrálásával egy valós csővezeték-hálózat ütemezéséhez. A modell fő célja, hogy meghatározza, hogy mikor kell a terméket a csővezetékbe nyomtatni és mikor kell a terméket az elosztó telephelyen kifogadni. Ezeknek az időpontoknak ki kell elégíteni a csővezeték hálózattal szemben támasztott elvárásokat. Ilyen elvárás például a csővezetékek engedélyezett leállásai, a termékek telephelyen/csővezetéken keresztül történő mozgása, a keveredési veszteségek elkerülése érdekében előnyben részesített útvonalak használata, a szivattyúzás csúcsidőben történő igénybevétele, a helyi korlátozások, az áramlási irány megfordítása és a kiegyenlítő tartály műveletei. A szerzők további megállapítása, hogy a többtermékes csővezetékek ütemezése három fő részre osztható: a terméksorrend meghatározására, a termékek méretének meghatározására, valamint a termékek elosztására az elosztó telephelyeken. Ezek heurisztikus kiválasztása után a működési döntések rövid CPU idő alatt végrehajthatók. A végső ütemezés jóságát nagyban befolyásolják az előzőleg meghozott heurisztikus döntések.

Mostafaei és társai [19] egy folytonos idejű MILP modellt fejlesztettek ki egy többtermékes csővezetékrendszer ütemezéséhez, amely egy finomítói és több elosztó telephelyből áll. A modell lehetővé tette, hogy nem csak a csővezeték végén lévő elosztó telephelyen, hanem a köztes elosztó telephelyeken is lehessen terméket nyomtatni vagy kifogadni. A modell célja a csővezeték teljes üzemeltetési költségének a minimalizálása, ezért fontos szempont a keveredésből származó és a nyomtatási költségek optimalizálása is. Az eredmények azt mutatták, hogy a javasolt modell jobb csővezeték ütemezést eredményezett, mint a korábbi hasonló problémával foglalkozó modellek. Később Mostafaei [20] és társai továbbfejlesztették az előző modelljüket [19] úgy, hogy lehetővé tették egy telephelyen termékek nyomtatását és kifogadását ugyanazon a szivattyúzási művelet során. Ezzel a módosítással csökkenthető az aktív és az üresjáratok közötti termékváltások száma, amely következtében az üzemeltetési költség is csökken. A korábbi modellekkel ellentétben a termékmérettel, terméksorrenddel és időzítéssel kapcsolatos döntéseket egyetlen lépésben határozták meg. A szerzők számos példát oldottak meg, hogy szemléltessék a javasolt modell hatékonyságát és számítási előnyeit mind a megoldás minőségében, mind a CPU-időben. Ezt követően Mostafaei és Castro [21] egy olyan új MILP modellt mutatott be egyenes csővezetékek ütemezéséhez, amely lehetővé teszi az elosztó telephelyen a termékek egyidejű nyomtatását és szállítását, valamint az egymással kölcsönhatásban lévő nyomtatási műveletek végrehajtását. Egymással kölcsönhatásban lévő nyomtatásról akkor beszélhetünk, amikor a csővezeték egy bizonyos szakasza egyszerre kap terméket egy finomítói telephelyről és egy elosztó telephelyről egyaránt. A korábbi modellekkel ellentétben az új modell szakaszfüggő koordinátákat használ. A tervezési hatékonyság érdekében a szerzők általánosított diszjunktív programozásra támaszkodtak, és olyan diszjunktciókat dolgoztak ki, amelyekre a konvex burok létrehozása egyszerű.

Castro és Mosafaei [22] egy új folytonos idejű MILP modellt fejlesztettek ki több közbenső elosztó telephellyel és tiltott terméksorozatokkal rendelkező elágazást nem tartalmazó csővezetékekhez. Az új eljárás képes volt a csővezetékekben lévő termékek mozgását anélkül modellezni, hogy termékeket rendeltek volna az egyes nyomtatásokhoz. Ezt az úgynevezett termék-centrikus összetételű modellt diszjunktív programozásból származtatták a szerzők, amely az előző munkájukhoz [21] hasonlóan

szakaszfüggő koordinátákat alkalmaz. A modell létrehozáskor kihívást jelentett olyan megkötések definiálása, amelyek követik az aktuális termék koordinátáit, ugyanakkor amikor a termék elhagyta a csövet, akkor a megkötés visszaállítható a csőbe belépő új termék számára. Ezen túlmenően új megkötések kidolgozására volt szükség, valamint inkluzívról kizárólagos diszjunkcióra kellett váltani, amikor egy csőszakra vonatkozó bemeneti és kimeneti áramlások kerültek modellezésre. A szerzők korábbi munkájukban szereplő modellekhez képest az új MILP modellben negyed annyi bináris változóra van szükség. Ez általában a teljesítmény egy-két nagyságrendű javulását jelenti. A modell legnagyobb hátránya, hogy egy csővön belül nem tudja kezelni a termék különböző tételeit, és emiatt nem megvalósítható MILP-eket generálhat olyan problémákra, amelyekre van megoldás. Előnye, hogy összetett struktúrák esetén nagyon hatékony lehet, valamint, hogy kezeli a tiltott szekvenciákat, amely a gyakorlatban meglehetősen gyakori megkötés. Mostafaei és társai [23] egy új folytonos idejű MILP modellt mutattak be, amely a szerzők előző munkájukhoz [20] képest sokkal kevesebb változóval valósított meg ütemezést valós igények alapján. Az új megközelítés figyelembe vette a tiltott szekvenciákat, a termék korlátozásokat a nagy mértékű szennyeződés elkerülése végett, valamint a készletkezelési megszorításokat a különböző csővezeték csomópontokon. A modell validálásához és teszteléséhez öt példaprobléma került felhasználására, amelyek közül három valós ipari adatokat tartalmazott. A szerzők a későbbiekben általánosítani szeretnék a bemutatott modellt, hogy az figyelembe tudja venni a tartályokban az ülepedési periódusokat, valamint, hogy modellezni tudja a finomítói telephelyre beérkező termékeket.

2.1.2 Ütemezés fa és hálószerű csővezeték hálózatokban

Castro [24] egy új, folytonos idejű MILP modellt mutatott be több finomító és elosztó telephelyből álló faszzerű csővezeték-hálózat rövidtávú ütemezéséhez. A modell újdonsága a több termék csővezetékén belüli áramlásához kapcsolódó komplex tárolási rend modellezése volt. Ez az erőforrás elosztási feladat hálózati folyamatábrázolás keretein belül valós és felhalmozódott mennyiségi erőforrások felhasználásával valósítható meg minden termékhez, nyomtatási, mozgatási, valamint kifogadási feladatokkal párosulva. A szerző által javasolt modell elemi építőelemek gyűjteményeként épült fel, amelyek közül a csővezeték szegmens a legfontosabb. Nyomatási, kifogadási és mozgatási feladatokat foglal magában, valamint átállási feladatokat, amelyek megváltoztatják a folyamat állapotát, miközben megakadályozzák a tiltott termék sorozatokat. A modell összevetésre került három korábbi folytonos modellel. Az eredmények azt mutatták, hogy a szerzők által létrehozott MILP modell ugyan szélesebb körben használható, azonban kevésbé hatékony általános problémák megoldása esetén.

Cafaro és Cerdá [25] egy új folytonos idejű MILP modellt mutatott be, amely lehetővé teszi fa szerkezetű csőhálózatok rövid távú ütemezését. Az új megközelítéssel minimális üzemeltetési költségek mellett lehet megtalálni az optimális nyomtatási és szállítási műveleteket, amelyek minden telephelyi igényt kielégítenek. A modell szigorú megkötésekkel rendelkezik a csőelágazásokra, valamint új termékek nyomtatására vonatkozóan, hogy elkerülhetők legyenek a tiltott terméksorozatokat, valamint, hogy meghatározhatók legyenek a keveredésekből származó újrafeldolgozási költségek. A kötegelt nyomtatás segítségével lehetőség van több termék azonos időben történő nyomtatására a csővekbe, amelynek egyenes következménye, hogy nagyobb ütemezési tervek optimális megoldása rövidebb idő alatt megvalósítható. A kifejlesztett modell három példán lett tesztelve, amelyek közül az egyik egy valós csővezeték-hálózat volt. Az eredményekből kiderült,

hogy a korábbi modellekhez képest a szerzők jelentős javulást értek el a mind a megoldás minőségében, mind a CPU-időben.

Később Cafaro és Cerdá [26] egy újszerű folytonos idejű MILP modellt fejlesztettek ki hálószerű csővezeték hálózatok ütemezésére. A megvalósított modell jellegzetessége, hogy egyszerre határozta meg a nyomatási műveletek kezdési idejét a telephelyeken, a termékek sorrendjét és méretét a csővezetékekben. Ezen kívül a modell minden telephelyen szigorúan nyomon követi a termékkészletek időbeli változásait, valamint a termékek mozgását az összes csővezetékekben. Mivel egy hálószerű csővezeték hálózatban két telephely között számos útvonal is létezhet, fontos feladat minden termék számára a legjobb útvonal kiválasztása. Az ütemezési tervek változó hosszúságú nyomatási műveletek sorozatából állnak. Egy csőbe mindig csak egy irányból lehet terméket feltölteni. Továbbá egy adott termék nyomtatását csak adott időintervallumban lehet elkezdni. A modell célja, hogy a tervezési időhorizonton belül minden termékigényt időben kielégítsen az elosztó telephelyeken minimális összköltséggel, beleértve a szivattyúzási, a keveredési, csővezeték használati és készlettartási költségeket. A szerzők az új megközelítést három összetett feladat megoldásával illusztrálták. Az alternatív útvonalak megjelenése ugyan növelte a megoldás nehézségét, azonban segítségükkel a zsúfolt útvonalakból adódó szűk keresztmetszetek elkerülhetővé váltak. A modell előnye, hogy képes értékelni az egyes útvonalakat üzemeltetési költségük alapján. Ezen információk birtokában a csőhálózat tervező könnyen meg tudja becsülni az új vezetékek beruházásának megtérülési idejét.

Magatão és társai [27] egy új dekompozíciós stratégiát alkalmazó módszert fejlesztettek ki többtermékes csővezetékrendszerek ütemezéséhez. A módszer alapja két MILP modell, amelyet egymás után kell megoldani. Az első, a tervezési modell, amely jellemzően egy hónapos időhorizonton belül határozza meg a teljes szállítandó termékmennyiséget és a használandó útvonalakat a fogyasztói igények és a csővezetékek szabad kapacitása alapján. A modell képes minimalizálni a csővezetékekben lévő áramlási irány megfordításainak a számát, valamint a kiegyenlítőtartály műveletekben érintett telephelyek számát a magas működési költségek csökkentése érdekében. A szerzők a modellt valós csővezeték-hálózatokra alkalmazták. Az eredmények azt mutatták, hogy a vállalat által használt módszerektől eltérően, az új módszer néhány másodperc alatt képes megoldásokat találni, alacsonyszámú szabálysértés mellett. A második, hozzárendelési és sorrendező modell a tervezési modell eredményei alapján a teljes termékmennyiséget nyomtatási műveletekre bontja. Ezt követően határozza meg a nyomtatási műveletek végrehajtási sorrendjét a rendelkezésre álló időhorizonton belül. A modell valós csővezeték-hálózatokon történő alkalmazása jelentős számítási teljesítményt igényelt már egyhetes ütemezési tervek esetén is. A szerzők a futtatásakor széles optimalitási rést tapasztaltak, így a megvalósított módszer továbbfejlesztésre szorult.

Később Magatão és társai [28] korábbi munkák [9], [27] alapján egy új dekompozíciós megközelítést mutattak be termékelosztás ütemezésére, valamint egy új MILP modellt, amely a korábban bemutatott időzítésért felelős matematikai modell kibővítése volt. Az irányváltási, a telephelyi és a kiegyenlítő tartály korlátozások továbbfejlesztésre kerültek, valamint további szivattyúzási korlátozásokat javasoltak. A termékek és a csövek ideális áramlási sebességét az ütemezési céloknak megfelelően az új modell határozza meg. Az új MILP modellhez javasolt dekompozíciós megközelítés egy relax-and-fix heurisztikán alapul, amelyet két MILP-modell egymás utáni futtatásával valósítanak meg: MLC (Model with Local Constraints) és MST (Model with Seasonal costs and Turn shift constraints). A dekompozíció célja a számítási igény csökkentése, ha a szezonális költségek és az irányváltási korlátozások aktívak. A szerzők a kifejlesztett modellt valódi többtermékes csővezeték-hálózatokon alkalmazták, amelyben számos ütemezési részletet (pl. erőforrásmegosztás,

készletkezelés, keresleti követelmények, műszakváltások, csúcsidőn belüli órák) voltak képesek kezelni elfogadható számítási időn belül (másodpercektől néhány percig). Ez jelentős előrelépés volt a korábbi, több órás számítási időt igénylő modellekhez képest.

Polli és társai [29] egy korábbi munka [28] alapján egy kollaboratív megközelítést mutattak be a termékek hozzárendeléséhez és sorrendbe állításához csővezeték hálózatokban. A megközelítés alapja egy heurisztikus algoritmus és egy MILP modell integrációja, amely olyan eseteket tud kezelni többtermékes csővezeték-hálózatok esetén, amelyekre a korábbi monolitikus MILP modellek egyike sem képes. A kidolgozott hozzárendelési/sorrendbeálló módszer használható termékek tételmeretezésének meghatározására, valamint képes a tételek optimális sorrendjének meghatározására is a forrástelephelytől a céltelephelyig. Az új módszert a korábban kidolgozott tervezési [27], szimulációs [9] és időzítési [28] eljárásokkal együtt alkalmazták rövidtávú ütemezéshez. Az első lépésében a heurisztika meghatározza a termékek küldésének prioritásait a határidőknek megfelelően. Az algoritmus magába foglalja a gyártási és eladási adatokat, a meglévő készleteket, valamint a telephelyek kimenő és bejövő termékeit, valamint megpróbálja optimálisan felhasználni az erőforrásokat (tartályok, csővezetékek). Az algoritmust egy MILP szekvenálási modellel együttműködve alkalmazzák a szerzők, amely lehetővé teszi a számítási nehézségek leküzdését, amely a korábbi hagyományos ütemezési modelleket jellemezte.

Castro [30] egy korábbi munkáját [22] alapul véve egy új MILP modellt mutatott be a csővezeték-rendszerek és ezekhez kapcsolódó tartályok általános ütemezéséhez. A modell a rendszert különböző telephelyeket összekötő csőszakaszok hálózatának tekinti, valamint lehetőség van a termékek mindkét irányú mozgatására. Az anyagátvitel modellezése a csőszakaszokból a telephelyekre a bal vagy jobb koordinátaváltozók segítségével történik. Ezek pontosan meghatározzák az összes terméktételt a csővezetéken belül. A modell legfőbb korlátja, hogy termékenként csak egy tétel megengedett egy csőszakaszon belül, amelynek következménye, hogy koordinátaváltozók visszaállítása csak azután lehetséges, miután a teljes termékmennyiség elhagyta az adott csőszakaszt. A termékek a csőszakaszba való belépéskor betartják a tiltott termék sorozatokra vonatkozó megkötéseket. A szerzők által bemutatott modell folytonos időre (és térfogatra) támaszkodik, amely a teljes időhorizontot kisebb időintervallumokra osztja. A csövekben lévő termékek folyamatos mozgása az aktuális csőszakasz áramlási sebességével jellemezhető, azonban ezek nem kapcsolódnak a modellváltozókhoz a linearitás megőrzése érdekében. A modellben a termékek sebességére meghatározott alsó és felső határok vonatkoztak. Állandó áramlási sebességet feltételezve az adott időintervallum alatt lehetséges a kapacitáskorlátok szigorú betartása több bemenettel és kimenettel rendelkező tartályok esetén is. A finomítók nyomtatási műveleteit a szerzők adottnak tekintették a vizsgált időhorizonton belül, de a modell adaptálható, hogy ezek is változók legyenek. Ez a változtatás azonban növelte az ütemezési terv végrehajtásához szükséges időintervallumok számát, amely kulcsfontosságú teljesítménymutató.

Liao és társai [31] egy folytonos térfogatú és diszkrét idejű reprezentáción alapuló MINLP modellt mutattak be. A modell célja, hogy meghatározza az összes nyomtatási műveletet az összes forrástelephelyen minimális üzemeltetési költség mellett, miközben figyelembe veszi a termékek méretét és elhelyezkedését, valamint az energiafogyasztást a csővezetékekben. A módszer hatékonyságának növelése érdekében a szerzők egy prioritási algoritmust dolgoztak ki, amely az egyes forrástelephelyekhez tartozó nyomtatási műveleteket állítja sorrendbe. Összevetve más kereskedelmi forgalomban kapható megoldóval a javasolt módszer viszonylag rövid időn belül jó minőségű ütemezési terveket képes kidolgozni. A vizsgált rendszer működése során az előállított termékeket

először tartályokban tárolják, majd szivattyúkon keresztül egy csővezetékbe irányítják a finomító telephelyeken. A szerzők megállapították, hogy a tartályok ütemezési tervei és számos feldolgozási megkötés közvetetten befolyásolja a csővezeték ütemezési tervét, ezért a jövőbeli munkájuk során a forrástelephelyeken lévő tartályokat, valamint az ütemezési terveket integrált módon fogják kezelni.

Bueno és társai [32] egy új módszert dolgoztak ki olajipari termékek kötegeinek két irányú csővezeték-hálózatokhoz történő hozzárendeléséhez és sorba rendezéséhez. Feltételezték, hogy minden telephely lehet forrás- és elosztó telephely is. A szerzők olyan működési sajátosságokat is érintettek, mint például a nyomatási műveletek, a csővezetékek áramlási irányának megfordítása, a degradáció, csőben történő termékkeverés, dugók szükségessége a termék keveredések elkerülése érdekében, tartálykarbantartási időszakok. A hozzárendelési megoldás létrehozásához a szerzők egy MILP modellt, míg a szekvenálási problémára egy heurisztikus algoritmust, valamint egy további MILP modellt alkalmaztak. Az utóbbi segítségével képesek voltak meghatározni a termékmennyiségeket, valamint a nyomatási sorrendet. A szekvenálási MILP modell a hozzárendelési MILP modell döntéseit bemeneti paraméterként felhasználva képes csökkenteni az áramlás-visszafordítási műveletek, a szükséges termékkötegek, valamint a készletekre vonatkozó megkötések sértéseinek a számát. A tesztekben egy valós csőhálózat működési sajátosságait vették alapul, ahol viszonylag rövid futási idő alatt lehetett hónapos ütemezési tervet létrehozni.

2.2 Az ütemezési terv szimulációja

A csővezeték szimulációs modellek ellenőrzik az ütemezési terv megvalósíthatóságát. Ezek a modellek általában a csővezetékeket többkiszolgálós sorba rendező rendszernek tekintik, ahol minden folyamat elején egy forrástelephely található. A csővekben lévő termékek sorrendje csak akkor változik, ha új termék lép be a csőbe vagy egy bent lévő kikerül. A forrástelephelyen bekerült termék hatására a csőben lévő termékek elmozdulnak, amelyek hatására a cső végén lévő terméket a rendszer a céltelephelyre vagy a következő csőbe irányítja. A többtermékes csővezeték-hálózat egymáshoz kapcsolódó, több forrás- és céltelephellyel rendelkező csővezetékek halmaza. A csővezeték-hálózat struktúrája lehet egyenes, fa és hálószerű. A szivattyúzási és szállítási műveleteket egyidejűleg, integrált módon kell ütemezni. A szimulációs megközelítés viszonylag alacsony számítási költségek mellett validálja az ütemezési tervet, de nem vizsgálja a terv minőségét.

Viszonylag kevés publikáció érhető el a csővezetékekben található olajtermékek szimulációjáról, és ezek többsége csak egy optimalizálási modell ellenőrzésére szolgál. Mori és társai [10] egy szimulációs modellt fejlesztettek ki olajipari termékek ütemezéséhez egy valós csővezeték hálózatban. A csővezeték-hálózat működésének szimulációja lehetővé teszi a csővezeték tartalom, valamint a tartályszinttel kapcsolatos problémák detektálását. Továbbá nyomon követhető a termékkészlet, valamint mérhető a késések hatása. A diszkrét eseményű szimuláció számos statisztikai mérőszámot határoz meg, például a csővezeték kihasználtság, áteresztőképesség. Ez felhasználható a szűk keresztmetszetek, a nem hatékony csőhasználat detektálására, vagy akár új ütemezési megközelítések azonosítására és osztályozására. A szerzők a szimulációs modellt egy fővezeték-ből, több finomító és elosztó telephelyekből, valamint egy kikötőből álló hálózatra alkalmazták.

Sánchez és társai [11] egy olyan hibrid módszert fejlesztettek ki, amely egy diszkrét eseményű szimulációs modellt egyesít Tabu kereséssel [33]. A szerzők megállapították, hogy számos kereskedelmi csővezeték-szimulátor létezik, amelyek nagy pontossággal szimulálják a rendszer különböző elemeinek viselkedését folyadékdinamikai tulajdonságok alapján. Azonban, mivel ezek az

eszközök nem használhatók csővezeték ütemezéshez, csak bizonyos tulajdonságok (pl. nyomás, viszkozitás) követésére, így egy újfajta szimulátor kidolgozása lett a cél. A szimulátort a Witness [34] kereskedelmi szimulációs csomag felhasználásával fejlesztették ki, amely számos előre meghatározott elemet biztosított, amely nagymértékben megkönnyítette a modellépítés folyamatát. Ezt követően a szerzők különböző szimulációs modulokat hoztak létre, amelyeknek két alapvető típusa van. Az első a rendszer elemeit reprezentálja (finomítók, kiszolgáló telephelyek, tartályok), a második pedig a modell vezérlését írja le. Az ismertetett módszerben a termékek egyenlő méretű diszkrét egységekre vannak felosztva, amelyek rendeltetési helye a nyomatási művelet megkezdése előtt már meghatározott. A szerzők a Tabu kereséssel biztosítják a nem praktikus ütemezések kizárását. Az ütemezési terv futtatása után a szimulátor számos információt biztosít az ütemező számára: nem kielégített igények, az időhorizont alatt le nem szállított termékmennyiségek, hiányok, dugulások, szivattyúleállítások száma, termékkeveredésből keletkezett költségek stb.

Cafaro és társai [12] egy olyan diszkrét eseményű szimulációs modellt fejlesztettek ki, amelynek segítségével szimulálható finomított termékek szállítása egy fővezetékéből több elosztó telephelyre. A szerzők megállapították, hogy a szimuláció nagyon hasznos szigorú optimalizálási technikák által biztosított csővezeték ütemezések ellenőrzéséhez. Továbbá lehetővé teszi alternatív havi termékszállítási ütemezések generálását és tesztelését egy percnél rövidebb CPU-idő alatt, különösen egy finomító és több céltelephellyel ellátott csővezeték hálózatok esetén. Az eredmények azt mutatták, hogy különböző prioritási tömbök alkalmazása jelentősen eltérő szállítási ütemezéshez vezethet, amely erősen befolyásolja az elért megoldás költségét. Például a legközelebbi finomító telephelyek előnyben részesítése a nem használt csővezetékek mennyiségének csökkenéséhez vezethet, azonban ezzel párhuzamosan a sztripping műveletek (a szivattyúállomások be- és kikapcsolása) száma biztosan növekedni fog. Másrészt a legtávolabbi telephelyek prioritása a csővezeték-leállítások számának jelentős növekedését okozhatja. A szerzők rámutattak, hogy az előzőekhez hasonló egyszerű szabályok ritkán vezetnek optimális megoldáshoz.

Noguera és Leirens [35] egy szimulációs rendszert valósítottak meg egy kolumbiai többtermékes csővezeték-hálózat ütemezéséhez. A rendszer részét képező termékkeverő modellt, összekötötték a csővezeték modellel, így a csövek be- és kimeneti nyomásváltozásai is megfigyelhetővé váltak a csősebesség függvényében. A termék szennyezettség modell figyelembe veszi a termékek sebességét a sűrűlátsági tényezőket is felhasználva. Egy többtermékes csővezeték-hálózatot építettek ki összekapcsolt csővezeték- és szivattyúmodellek segítségével. A MATLAB-ban [36] megvalósított szimuláció segítségével nyomkövethetővé váltak a termékváltások, valamint a szivattyúmeghibásodások.

A Muzy és Hill [37] által javasolt tevékenység-alapú szimulációs módszer alapján, Shibata és társai [38] egy olyan olajipari ütemezési szimulátort fejlesztettek ki, amely egy döntéstámogató rendszer részeként képes kiszámítani a várható tevékenységeket hónapos tervezési időhorizontra. A szimulátort többféle ütemezési tervvel tesztelték a Petrobas olajipari vállalat OSBRA nevű csővezeték-hálózatán. A tesztek legjelentősebb eredménye, hogy perc pontossággal képes kiszámítani a szimulátor a várható tevékenységeket átlagosan fél másodperc alatt egy átlagos teljesítményű laptopon. A szimulációs modell képes figyelembe venni a vállalat által alkalmazott működési szabályok széles skáláját, így az üzemeltetők hatékonyan tudták elemezni a termékszállítás működésének viselkedését.

Costa és társai [39] olyan új szimulációs modellt dolgoztak ki a brazil termékvezetékekhez, amely figyelembe veszi a kötegelt ütemezést és a tárolási kapacitásokat. A szerzők megállapították, hogy a modell segítségével hatékonyan elemezhető a termékek szállítási működése egy hosszú kapacitáskorlátozott vezetékhálózaton keresztül. Mivel a terméksorrend kulcsfontosságú a szimulációban, ezért az egy prioritási heurisztikán alapul, amely reális alternatívákat biztosít anélkül, hogy optimalizálási vagy meta-heurisztikai számítási költségeket kellene figyelembe venni. A megvalósított módszer számos egyszerű szabályt alkalmaz egy összetett logisztikai rendszer pontos modellezéséhez. A finomítótól az elosztó telephelyekig tartó utakat különböző, önálló logisztikai csatornákként azonosították, amelyek az út során megosztják az erőforrásokat. A termékek hosszú utat tesznek meg, hogy lefedjék ezeket a csatornákat, és gyakran hátráltatják őket különböző ütemezési nehézségek, amelyeket el kell kerülni akár a szabályok megsértésével, akár az erőforrások biztosításával.

Ortega-Mier és társai [40] egy új szimulációs eszközt mutattak be többtermékes csővezetékek ütemezéséhez. A szerzők megállapították, hogy ugyan számos kereskedelmi csővezeték-szimulátor létezik, amelyek nagy pontossággal szimulálják a rendszer különböző elemeinek teljesítményét folyadékdinamikai tulajdonságok alapján (nyomás, viszkozitás stb.), azonban ezek nem használhatók a csővezetékek ütemezéséhez. Az ütemezés során felmerülő döntéshozatali folyamatok támogatására egy szimulátor került kidolgozásra. A folyamatok egyszerűbbé és gyorsabbá tétele érdekében számos modul került létrehozásra, amelyek egymással összekapcsolhatók. A moduloknak két alapvető típusa van. A rendszer elemeit reprezentáló- (finomítók, elosztó telephelyek, tartályok és elágazási modulok) és a modell vezérlésére szolgáló modulok (általános, statisztikai, naptári és inicializálási modulok). A szimulátor futtatása után számos információ jelenik meg az ütemezőknek: nem kielégített igények termékekre lebontva, hiányok és dugulások összesített száma, illetve a csőben álló termékek száma. A szimulátorban lehetőség van különböző áramlási sebességek kezelésére. A sebesség a csővezeték tartalmától és az áramlást segítő anyag mennyiségétől függ. Az eszköz segítségével a szerzők hatékonyan oldottak meg ütemezési problémákat egy spanyol vezetékhálózaton.

Geramianfar és társai [41] egy új szimulációs optimalizálási modellt fejlesztettek ki. A szerzők a modellt az Arena [42] szimulációs szoftver segítségével dolgozták ki kombinálva az OptQuest [43] optimalizáló motorral. A módszer képes meghatározni a csővezetékekbe nyomtatandó termékek sorrendjét, mennyiségét, a futási időt, az egyes termékek nyomtatásának kezdeti és befejezési idejét, valamint a telephelyekre szállított termékek mennyiségét. Továbbá minimalizálja a keveredés, az utánrendelés és a szivattyúzás költségeit, miközben a csővezetékek legmagasabb kihasználtságára törekszik. A bemutatott szimulációs optimalizálási modellt valós ütemezési terveken alkalmazták. Egy korábban ismertetett MILP modellhez [15] képest, jelentősen csökkenteni tudták a finomított olajtermékek szállítási összköltségét. A szerzők megállapították, hogy a módszer jól használható csővezetékes ütemezési problémák megoldására, hosszú távú ütemezések esetén.

Wang és társai [44] néhány hatékony módszert mutattak be a gáz- és folyadékáramlás-vizualizációs szimulációhoz komplex csővezeték-hálózatban, azzal a céllal, hogy csökkentsék a csővezeték-hálózat topológiájától való függést. A szerzők egy módszert javasoltak a csővezeték-hálózat topológiájának paraméteres információira, valamint az egyes csővezetékek alakjának, méretének és helyzetének meghatározására. A paramétervezérelt modellezést arra használták, hogy a csővezeték-modellt darabokra bontsák a folyadékáramlási folyamat hatékonyabb szimulációja érdekében. A szerzők egy gráfelméleten és csővezeték állapoton alapuló módszert javasoltak a gáz- és

folyadékáramlás szimuláció megvalósítására tetszőleges topológiájú csővezeték-hálózatban. Végül egy szimulációs rendszer tervezésével és implementálásával validálták az ismertetett módszereket.

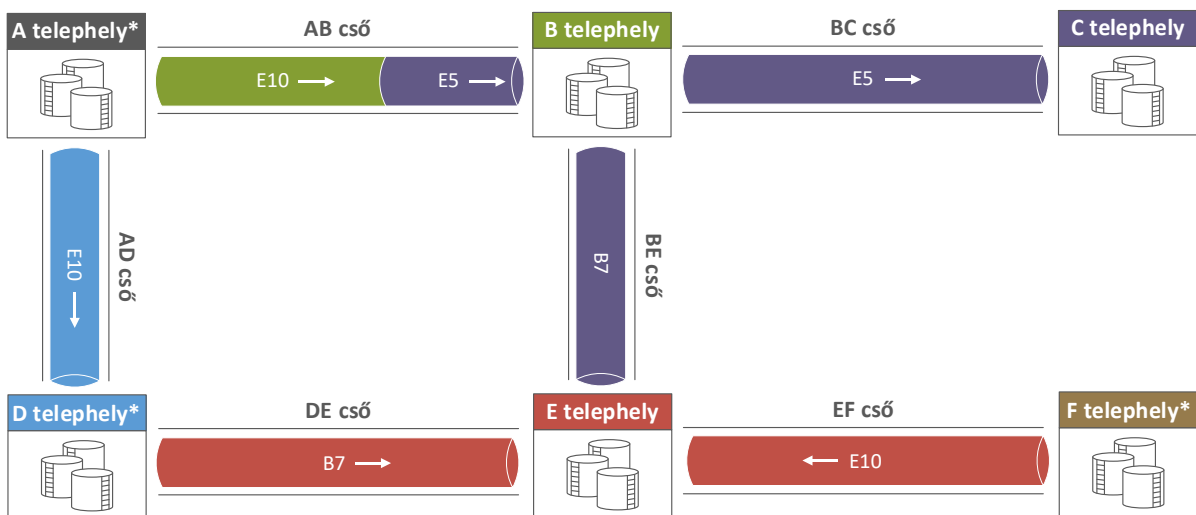
Bueno és társai [45] egy szimulációs eljárást dolgoztak ki nehézolaj származékok szállítására. A csővezeték-hálózat négy finomítóból, három elosztó telephelyből, egy kikötőből és hét csővezeték-ből állt. A szállítást az ellátási igények és a működési korlátok befolyásolták. A hálózati ütemezést online generálja egy szimulációs modell. A szerzők által kitűzött cél az volt, hogy az ütemezést a hajók nem determinisztikus érkezésének megfelelően valósítsák meg, valamint az így keletkezett ütemezési tervet össze tudják hasonlítani egy kidolgozás alatt lévő optimalizálási és szimulációs technikákat kombináltan alkalmazó hibrid megközelítéssel [46]. Az optimalizálás nélküli szimulációs eljárásban a csővezetékek folyamatos áramlású entitásokként kerültek modellezésre. A kapott eredmények különböző valószínűségi eloszlások validálását teszik lehetővé a hajók érkezésére, valamint jelzik a hibrid és a szimulációs módszerek közötti különbségeket.

Strachotova és Dyntar [47] munkájukban többtermékes csővezetékrendszerek hatékony diszkrét modellezését írják le Witness szimulációs környezetben. A megvalósított diszkrét idejű modell a feldolgozási funkciók széles skáláját képes kezelni, valamint lehetővé teszi az időben változó erőforrás-rendelkezésreállítás modellezését. A modellben lévő csöveket úgy ábrázolják, hogy hatékony legyen a termékek kétirányú áramlásának a modellezése, amely növeli a csővezetékes szállítási kapacitás kihasználását. A modellben alkalmazott fizikai elemek viszonylag alacsony száma pozitív hatással van a futási sebességére. A megvalósított modell számítási ideje meghatározható a termékáramlás diszkrétizáltsági fokának kiválasztásával, amely befolyásolja a nyomatási műveleteket végrehajtó berendezések ciklusinak számát. Ez olyan helyzetekben hasznos, amikor a rendszert teljes részletességgel kell felülvizsgálni, vagy amikor gyors számításokra van szükség. A termékek mennyiségének beállítása, valamint az áramlásuk diszkrétizálása, olyan helyzetekben is hasznos, amikor a termékkeveredés befolyásolja a szivattyúzási ütemterv megvalósíthatóságát. A nyomatási módok és tartályok elérhetőségének korlátozásával a telephelyeken lehetőség nyílik a karbantartás vagy a meghibásodások szimulálására is. A modell egyszerűsége miatt az könnyen átvihető más szimulációs környezetbe is, mint például a Simul8 [48] vagy az Arena.

3. Problémadefiníció

3.1 Illusztrációs példa egy csőhálózat működésére

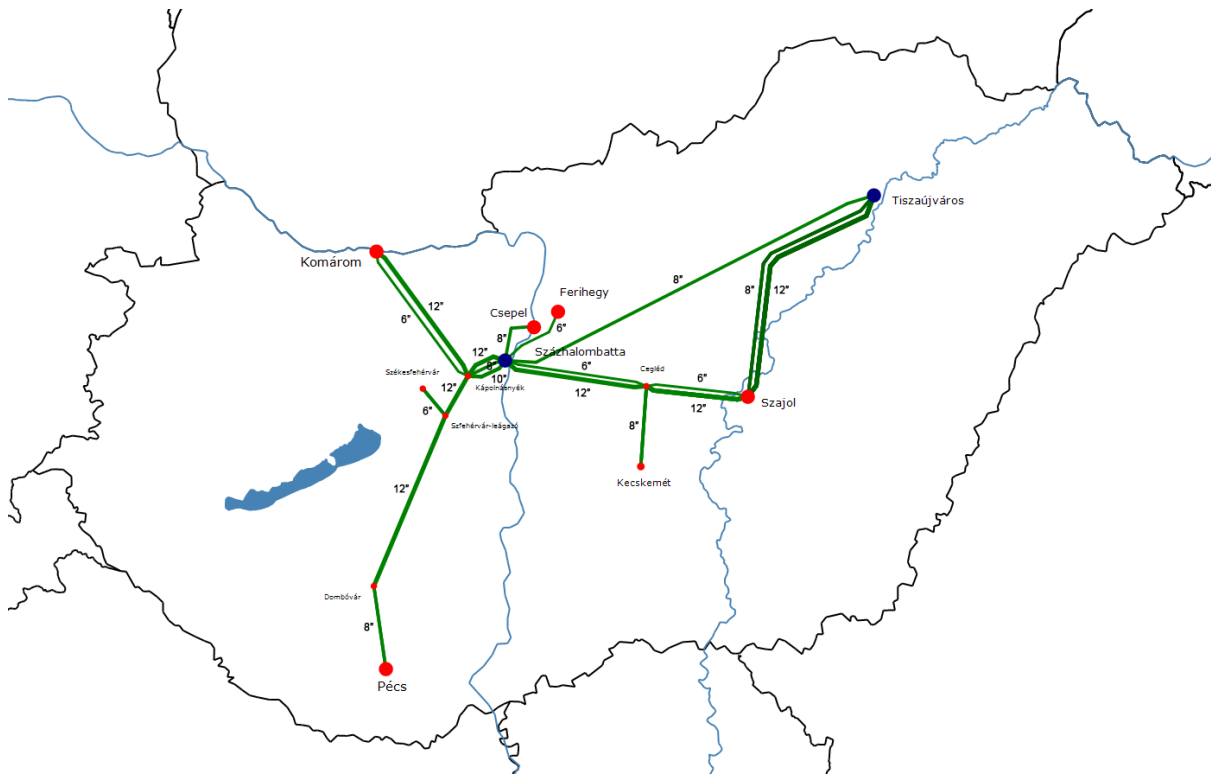
A termékvezeték-hálózatok három fő részből állnak: telephelyek, tartályok és csővezetékek. A telephelyek földrajzilag szétszórtan helyezkednek el. A telephelyek lehetnek finomítók és/vagy elosztó telephelyek. Minden telephelyen számos tartály található, amelyekben különböző termékeket tárolnak. A telephelyeket 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.

3.2 Egy valós csőhálózat ismertetése

Az ütemezőknél 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 vezeték 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.

A MOL vezetése a vezetékek magas rendelkezésre állását és előrelátható ütemezését várja. Az első követelmény miatt a csöveket SCADA [49] rendszerrel folyamatosan felügyelik. Kezdetben a második követelmény teljesítésére a logisztikai csoport ütemezői csak rövid, maximum 3-4 napos gördülő ütemezést tudtak készíteni. Ennek oka a rendszer bonyolultsága. A MOL 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 tárolókapacitás a céltelephelyen.

3.3 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 kettéválasztás 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) kötegelt módon történik. Keverési művelet közben a tartály zárolva 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.

3.4 A cél megfogalmazása

A MOL vezetése megbízható 30 napos hosszú ütemezést tűztek 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.

4.A diszkrét-eseményű szimulációs modell felépítése

Ebben a fejezetben kerül bemutatásra az általunk kidolgozott eseményvezérelt szimulátor (ESZ). A szimulációban résztvevő erőforrások és a rendszer alapját képező események az egyes alfejezetekben kerülnek bemutatásra.

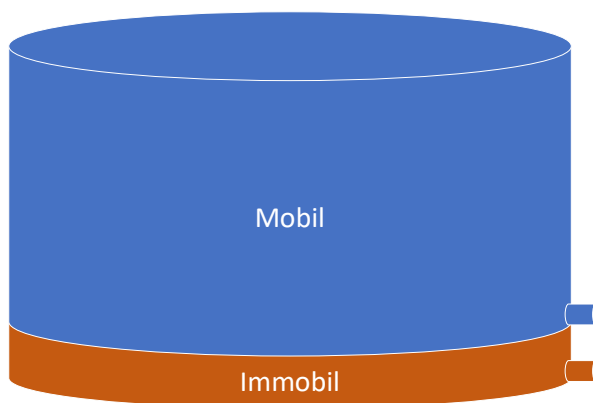
4.1 Erőforrások

4.1.1 Telephelyek

A telephelyek olyan elosztó központok, ahol a megrendelők átvehetik a termékeket. A telephelyeknek két fajtája van: finomító telephelyek és elosztó telephelyek. A finomítói telephelyen történik a termékek gyártása. A finomító telephelyek jellemzően több terméket állítanak elő, mint amennyit az adott tervezési időszakon belül tárolni és értékesíteni tudnak. Emiatt a termékeket folyamatosan szállítani kell az elosztó telephelyekre. A telephelyek között a termékek szállítása preferáltan csővezetékeken történik nagynyomású szivattyúk segítségével.

4.1.2 Tartályok

A termékek tárolása a telephelyeken lévő tartályokban történik, majd innen közúton, vasúton, uszályon vagy csővezetéken szállítják tovább. Az olajiparban a tartályok kialakítása speciális, lásd a 3. ábrán. A tartály alsó részében található egy úgynevezett immobil rész, amelyet normál működés során nem szoktak leüríteni. A szennyeződések a tartály alsó részén rakódnak le. A felső, úgynevezett mobil részt használják a mindennapokban.



3. ábra. Olajipari tartályok térfogat szintjei.

Egy termék telephelyi készletét a megfelelő tartályokban tárolt termékmennyiségek összeadásával kapjuk meg. A termelés, az értékesítés és a szállítás következtében a termékek készlet szintje változik. A szimulációs modellben a következő tartály korlátozásokat vesszük figyelembe:

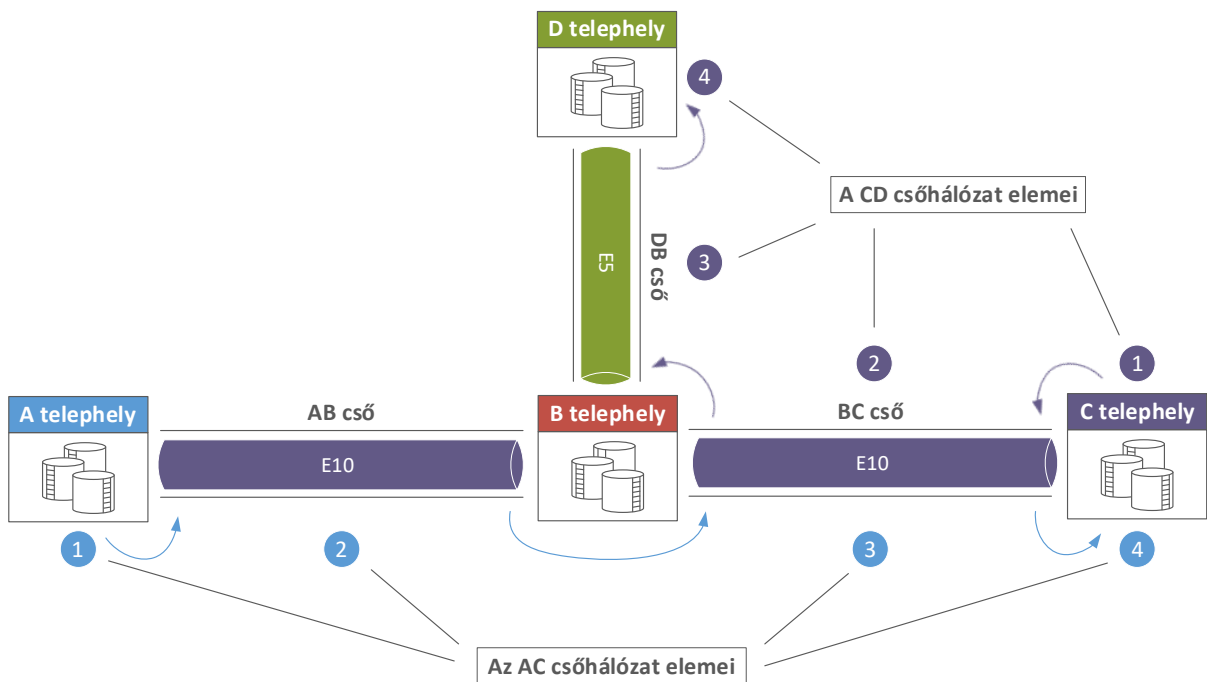
- A tartályok nem üríthetők le egy minimális (immobil) szint alá és nem tölthetők fel a maximális (mobil) szint fölé.
- Minden tartályban csak egyféle termék tárolható.
- Egy telephelyen több olyan tartály is lehet, amely ugyanolyan típusú terméket tartalmaz.

- A kezdeti tartálysintet figyelembe kell venni.
- A tartály zárva van addig, amíg a termék keverési művelete be nem fejeződik. Ezt követően válik elérhetővé az elkészített termékmennyiséggel.

4.1.3 Csövek és csőhálózatok

A telephelyek között a termékek szállítása csővezetékek segítségével történik. Egy csőben lévő összes termék együtt mozog. Az ütemezési terv tartalmazhat olyan nyomatási műveletet, amely megfordítja a csőben lévő termékek áramlási irányát. A szimulációs modell kezdeti verziójában egy fizikai cső két irányított csőszakasszal lett modellezve, amelyek közül mindig csak az egyik lehetett aktív. Az irányított csövek csőhálózatokat alkottak, hasonlóan ahhoz, ahogy a gráf élei irányított útvonalat alkotnak. A végleges modellben egy fizikai csövet már csak egy cső objektummal modellezzük. A cső áramlási irányát az adott csőhálózat határozza meg. A tervben lévő összes nyomatási művelethez tartozik egy csőhálózat, amely egyértelműen azonosítja a forrás és cél telephelyét, valamint a közöttük lévő csöveket és azok sorrendjét. A szimuláció alatt egy termék aktuális helyzete bármikor lekérdezhető. A rendszer a következő csővezeték korlátozásokat veszi figyelembe:

- A csővezetékekben csak nyomatási művelet hatására áramolnak a termékek. Két nyomatási művelet végrehajtása között hosszabb időszak is eltelhet (szakaszos működés).
- Egy cső szállítási sebességét meghatározhatjuk a csőben lévő termékek elméleti sebességeinek a minimumából.
- Egy csőhálózat meghatározza a csőbe nyomatott termék forrás- és céltelephelyét, valamint azon csövek sorrendjét és irányát, amelyeken a terméknek végig kell haladni.
- Ugyanazon csövet több csőhálózat is tartalmazhatja. Például a 4. ábrán az AC csőhálózat első eleme az A telephely, majd ezt követi az AB cső (áramlási irány: A telephely -> B telephely), a következő elem a BC cső (áramlási irány B telephely -> C telephely) és végül a C telephely. A CD csőhálózat első eleme a C telephely, majd ezt követően a BC cső (áramlási irány: C telephely -> B telephely), a következő elem a DB cső (áramlási irány: B telephely -> D telephely) és végül a D telephely. Az AC és a CD csőhálózatok mindegyike tartalmazza a BC csövet, azonban más áramlási iránnyal.
- Minden cső több terméket is tartalmazhat.
- A csövek áramlási iránya az üzemeltetésnek megfelelően változtatható.



4. ábra. Példa a csőhálózatok közös elemeire.

4.2 Ütemezési terv

Az ütemezők a beérkezett igények alapján készítik el az ütemezési terveket. Egy igényt az IG kifejezés határozza meg:

$$IG = (Az, VallalatAz, Hatarido, TelephelyAz, TermekAz, Mennyisege) \quad (1)$$

Az első paraméter az igény egyedi azonosítója. A második határozza meg az ügyfelet. A harmadik az a dátum, ameddig az igényt teljesíteni kell. A negyedik az a telephely, ahova a terméket kell szállítani. Az utolsó két paraméter pedig meghatározza a megrendelt terméket és annak mennyiségét.

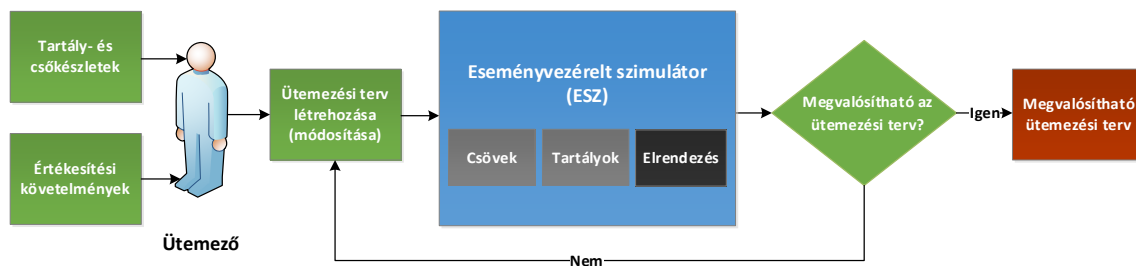
A modell korai változatában az ütemezési terv csak azokat a nyomtatási műveleteket tartalmazta, amelyek a telephelyi igények kielégítéséhez szükségesek voltak. A modell kibővítésével az ütemezési tervben szereplő műveletek köre tovább bővült: útvonalmódosítási, kettéválasztási, szelep, és tartályműveletek. Egy NYM nyomtatási művelet a következő adatokat tartalmazza:

$$NYM = (Az, VegrehajtsiIdo, CsohalozatAz, ForrastartalyAz, CeltartalyAz, TermekAz, Mennyisege) \quad (2)$$

Az első paraméter a nyomtatási művelet egyedi azonosítója. A második az az időpont, amikor a nyomtatási műveletet el kell indítani. A harmadik azt a csőhálózatot határozza meg, amelyet a csőbe nyomtatott terméknek követnie kell. A negyedik és az ötödik határozza meg a forrás- és céltartályokat. Végül az utolsó kettő paraméter határozza meg a terméket és annak mennyiségét.

Az ütemezési tervet az ütemezők hozzák létre. Ennek a folyamatnak egy egyszerűsített változata az 5. ábrán látható. Egy ütemterv létrehozásának kezdetén az ütemező lekéri az aktuális tartály- és csőkészletet, valamint a telephelyi igényeket. Ezt követően az ESZ segítségével az ütemező elkészíti az ütemtervet, amelyben meghatározza a végrehajtandó feladatokat (pl.: keverési műveletek, nyomtatási műveletek stb.) és azok időpontját. Az időpontok egyben prioritások is, a legkorábban kezdődő

művelet a legmagasabb prioritású. Ezt követően az ESZ ellenőrzi, hogy a terv megvalósítható-e, figyelembe véve az erőforrásokat, a javasolt ütemezési tervet és az igényeket. Ha az ellenőrzés közben valami probléma lép fel, akkor szimuláció leáll és egy hibaüzenetet jelenik meg az ütemező számára, amely alapján módosítani tudja a tervet. Ha hiba nélkül fut le a szimuláció, akkor a terv megvalósítható. A valóságban az ütemezőknek folyamatosan egyeztetni kell a vállalat többi részlegével. Például kiderülhet, hogy a finomító nem tud elég terméket gyártani időben, vagy a logisztikának nem áll rendelkezésére elegendő tartálykocsi a szállításhoz. Ilyenkor jelezni kell a kereskedőknek, hogy egy adott igény nem teljesíthető. A kereskedő ekkor felveszi a kapcsolatot a vevővel és módosíthatják az igényt. Az igények módosulásakor az ütemezési tervet is át kell alakítani.



5. ábra. Egy ütemterv létrehozása.

Az ütemezőket nagyban segítik a tervezési tapasztalataik, valamint az egyes telephelyi igények periodikussága. Fontos megemlíteni, hogy egyes termékek fogyasztása nagyban változhat a szezonális igényektől függően. Nehéz hosszú időintervallumra pontosan megjósolni a helyi piaci igényeket és azok változásait. Emiatt az ütemezőknek folyamatosan frissíteniük kell az ütemterveket az új igények kielégítése érdekében. Előfordulhat olyan eset is, amikor a finomítók nem tudnak elegendő terméket gyártani, ilyenkor az ütemezők telephelyi keverést ütemeznek be. A rendszeresen ismétlődő telephelyi igényekhez általában ugyanazokat a csőhálózatokat használják, de előfordul, hogy alternatív útvonalakat kell alkalmazni. Az ütemezőknek törekedniük kell arra, hogy egy termékből, minél nagyobb mennyiség kerüljön egyszerre elküldésre. Ennek célja, hogy a két egymás melletti termék határfelületén keletkezett keveredés mennyisége a legkisebb legyen. Például, egy eltérő komponensű B7 dízel és E10 benzin keveredéséből keletkező slopot vissza kell szállítani a finomítóba, míg egy azonos komponensű B10 és B5 benzin keveredéséből keletkező slop értékesíthető B10 benzinként.

4.3 Események

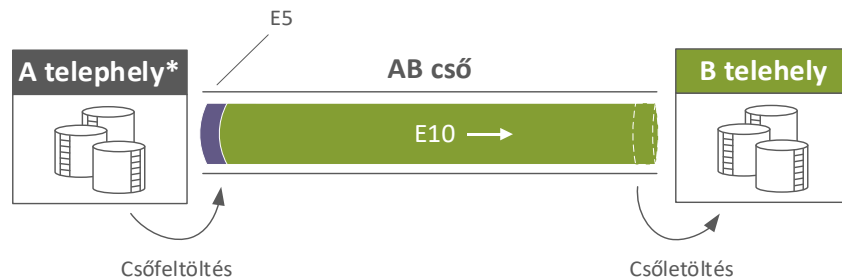
A javasolt szimulátor számos esemény kezelésére képes. A kezdő esemény kivételével minden egyes eseményt egy másik esemény hoz létre. Ha egy esemény nem hajtható végre, akkor a szimuláció véget ér, és az ütemező egy értesítést kap, hogy a terv nem megvalósítható. A szimulációs rendszerben a következő események szerepelnek:

- **Műveletindítás:** Ez az esemény indítja el az aktuális nyomtatási műveletet. Ha az esemény végrehajtható, akkor egy Tartályletöltés eseményt generál.
- **Tartályletöltés:** Ez az esemény indítja el a tartály letöltését a forrás telephelyen. Ha az esemény végrehajtható, akkor egy Csőfeltöltés eseményt generál.
- **Csőfeltöltés:** Ez az esemény indítja el a cső bemenetén egy termék feltöltését. Ha az esemény végrehajtható, akkor egy Csőletöltés eseményt generál.

- **Csőletöltés:** Ez az esemény indítja el a cső kimenetén lévő termék letöltését. Ha a kimenő termék céltelephelye a cső végén lévő telephely, akkor egy Tartályfeltöltés eseményt generál. Ellenkező esetben egy Csőfeltöltés eseményt generál, amelynek hatására a cső kimenetén lévő termék a következő csőbe kerül.
- **Tartályfeltöltés:** Ez az esemény indítja el a tartály feltöltését a céltelephelyen.

4.4 A cső működése

A javasolt modell szerint a csövekben szállított összes termék összennyomhatatlan folyadék, ideális, dugószerű áramlással. A 6. ábrán látható, hogy a cső folyamatosan tele van, és a cső bementén benyomott E5 benzin hatására ugyanannyi térfogatú E10 benzin távozik a cső kimenetén. Minden aktív csőhöz tartozik egy Csőfeltöltés esemény, amely egy Csőletöltés eseményt generál. A Csőfeltöltés esemény zárja a csövet az adott elemi időintervallumra. Ha ugyanerre a csőre és elemi időintervallumra egy másik Csőfeltöltés eseményt is végre kell hajtani, akkor a szimuláció hibát fog jelezni, mivel a cső már használatban van. Egy Csőletöltés eseménynél, ha a csőből kilépő termék céltelephelye nem egyezik meg a cső végén lévő telephellyel, akkor egy új Csőfeltöltés esemény generálódik. Ekkor a termék a csőhálózatában meghatározott következő csőbe fog áramolni.



6. ábra. A cső szemléltetése: a benyomott és kifogadott termék mennyiségének meg kell egyeznie.

5. Szimulációs módszerek csővezetékes ütemezéshez

5.1 Szigorú szimuláció

A szigorú szimuláció az ütemező által tervezett műveletek (pl. csővezetékes szállítás, tartálykeverés) végrehajtását vizsgálja. A szimulátor diszkrét elemi időintervallumokban halad végig a szimulált időszakon, és minden intervallumra meghatározza a rendszer állapotát (pl. csövek és tartályok tartalma, tartályok rendelkezésre állása), valamint az egyes műveletek állapotát (pl. egy adott nyomatási műveletnél a már csőbe nyomatott és még nyomatandó termék mennyisége egy adott időpontban).

5.1.1 Alapvető szabályok

Legyenek az alábbi halmazok és elemek:

- CS : a csövek halmaza, ahol cs_i egy cső ($i \in \{1, 2, \dots, n\}$),
- TA : a tartályok halmaza, ahol ta_j egy tartály ($j \in \{1, 2, \dots, m\}$),
- NYM : a nyomatási műveletek halmaza, amelyet az ütemezők a beérkezett telephelyi igények alapján állítanak össze, ahol nym_k egy nyomatási művelet ($k \in \{1, 2, \dots, p\}$),
- CSH : a csőhálózatok halmaza, ahol csh_l egy csőhálózat ($l \in \{1, 2, \dots, q\}$),
- TE : a termékek halmaza, ahol te_m egy termék ($m \in \{1, 2, \dots, r\}$),
- EI : a szimulációs idő elemi időintervallumokra bontott halmaza, ahol ei_n egy elemi időintervallum ($n \in \{1, 2, \dots, s\}$).

Minden egyes $nym_k \in NYM$ nyomatási művelet esetén definiálni kell:

- $forrastartaly(nym_k)$: az nym_k nyomatási művelethez tartozó forrástartály, ahol $forrastartaly: NYM \rightarrow TA$,
- $celtartaly(nym_k)$: az nym_k nyomatási művelethez tartozó céltartály, ahol $celtartaly: NYM \rightarrow TA$,
- $csohalozat(nym_k)$: az nym_k nyomatási művelethez tartozó csőhálózat, ahol $csohalozat: NYM \rightarrow CSH$,
- $termek(nym_k)$: az nym_k nyomatási művelethez tartozó termék, ahol $termek: NYM \rightarrow TE$,
- $mennyiseg(nym_k)$: az nym_k nyomatási művelethez tartozó termék mennyisége.

Minden egyes nym_k nyomatási művelethez tartozó csőhálózat, $csohalozat(nym_k)$, úgy definiálható, hogy $csohalozat(nym_k) = [cs_{k1}, cs_{k2}, \dots, cs_{kr}]$, ahol $cs_{ki} \in CS$ a csőhálózat i -edik csőve, és $i \in \{1, 2, \dots, r\}$.

Egy nyomatási művelethez tartozó termék áramlási sebességének kiszámításához, meg kell határozni minden egyes cs_{ki} csőben lévő termékek sebességének minimumát, amely legyen $sebesseg(cs_{ki})$. A nym_k nyomatási műveletben lévő termék áramlási sebessége a csövekben lévő termékek minimuma:

$$sebesseg(nym_k) = \min\{sebesseg(cs_{k1}), sebesseg(cs_{k2}), \dots, sebesseg(cs_{kr})\} \quad (3)$$

Mielőtt egy csőbe nyomatott termék kilépne egy csőből, először át kell haladnia a cső teljes hosszán. Ebből az következik, hogy egy csőbe történő feltöltés és letöltés között legalább annyi időnek

kell eltelnie, mint amennyi idő alatt az adott térfogatú termék végig tud menni az adott csövön a termék sebességének minimumával.

Ez alapján legyenek az alábbi definíciók:

- $kezdesiDo(csofeltoltes_{k,cs})$: az az időpont, amikor elkezdődik a cső feltöltése a k -adik nyomatási műveletnél és a cs csőnél
- $kezdesiDo(csoletoltes_{k,cs})$: az az időpont, amikor elkezdődik a cső letöltése a k -adik nyomatási műveletnél és a cs csőnél

Az előzőek alapján a következő összefüggés írható fel:

$$kezdesiDo(csoletoltes_{k,cs}) \geq kezdesiDo(csofeltoltes_{k,cs}) + \frac{mennyisege(nym_k)}{sebessege(nym_k)} \quad (4)$$

Ha egy csőhálózat több csövet tartalmaz ($t > 1$), akkor minden csőben a nyomatási művelet kezdési idejével párhuzamosan kell végrehajtani a feltöltési és letöltési műveleteket. Ez formálisan a következő módon fogalmazható meg:

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, t\}, kezdesiDo(csofeltoltes_{k,cs_{ki}}) = kezdesiDo(csofeltoltes_{k,cs_{k1}}) \quad (5)$$

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, t\}, kezdesiDo(csoletoltes_{k,cs_{ki}}) = kezdesiDo(csoletoltes_{k,cs_{k1}}) \quad (6)$$

Azonos időben nem használhatók ugyanazon csövek különböző nyomatási műveletek elvégzésére. Ha két nyomatási művelet nym_k és $nym_{k'}$ ugyanazt a csövet (cs) használja, akkor a csőfeltöltési időpontoknak különbözőnek kell lenniük:

$$kezdesiDo(csofeltoltes_{k,cs}) + \frac{mennyisege(nym_k)}{sebessege(nym_k)} < kezdesiDo(csoletoltes_{k',cs}) \quad (7)$$

A tartályok és a csővezetékek közötti kapcsolat a következőképpen írható le. Egy ei_n elemi időintervallum alatt a forrástartályból kifogadott termékmennyiség az első csőbe kerül, és az utolsó csőből a céltartályba. Ez a következő módon formalizálható:

- A forrástartályból az első csőbe: $forrastarty(nym_k) \xrightarrow{ei_n} cs_{k1}$
- Az első csőből a következő csőbe: $cs_{k1} \xrightarrow{ei_n} cs_{k1+1}$
- Tetszőleges csőből az utolsó csőbe: $cs_{ki} \xrightarrow{ei_n} cs_{kr}$
- Az utolsó csőből a céltartályba: $cs_{kr} \xrightarrow{ei_n} celtarty(nym_k)$

5.1.2 Szimuláció folyamata

A csővezetékes szállítás modellezése összetett feladat. A csővezetékek puffer hatása, a csőhálózat elágazásai és az egyes nyomatási útvonalak közös csövei miatt az egyes nyomatások szimulációja nem végezhető el a többi nyomatástól függetlenül. Például az éppen szimulált nyomatás egy másik (akár eltérő céltelephelyű) terméket tolhat maga előtt. Ahhoz, hogy ezt a helyzetet kezelni lehessen, szükség van a másik termék adataira is (pl. nyomatási útvonal információ).

A javasolt szimulátor az ütemező által tervezett tevékenységek végrehajtását ellenőrzi. A szimulátor diszkrét elemi időintervallumokban halad végig a szimulált időszakon és minden intervallumban meghatározza a rendszerben szereplő erőforrások paramétereit és az egyes tevékenységek állapotát. A szimulátor egyszerűsített pszeudó kódja a 7. ábrán látható.

```

1  EI létrehozása // EI az elemi időintervallumok halmaza
2  Ciklus ei ∈ EI
3      Csőfoglalások törlése
4      NYM létrehozása // NYM a nyomatási műveletek halmaza ei-ben
5      Ciklus nym ∈ NYM
6          E létrehozása = {Műveletindítás} // E az események verme
7          Nyomatási műveletben lévő termék áramlási sebességének meghatározása
8          Ciklus amíg E ≠ 0
9              e = E.Kivesz() // E legfelső eseményének kiválasztása
10             e végrehajtása // Ehhez szükséges a korábban meghatározott áramlási sebesség
11             Ha e típusa nem Tartályfeltöltés akkor
12                 e' létrehozása
13                 E.Berak(e') // Új esemény hozzáadása E-hez
14             Elágazás vége
15         Ciklus vége
16     nym frissítése // Kezdési idő, termékmennyiség
17     Ciklus vége
18     Ciklus vége

```

7. ábra. A szigorú szimuláció működésének pszeudó kódja.

Az első szinten a teljes szimulációs időt elemi időintervallumok sorozatára kell bontani, majd ezeket az időintervallumokat sorban kell szimulálni. Az ütemezési terv, akkor megvalósítható, ha minden elemi időintervallum megvalósítható. Ha vannak olyan nyomatási műveletek, amelyek csak a szimulációs idő vége után érnek véget, akkor azok csak részben ellenőrizhetők. Ilyen esetben a szimuláció időtartamát meg lehet hosszabbítani, hogy az összes nyomatási művelet ellenőrzésre kerüljön.

A második szinten a szimulátor először törli a cső foglalásokat. Ezt követően ellenőrzi, hogy vannak-e nyomatási műveletek az adott időintervallumban, és ha igen, akkor egyenként szimulálja azokat.

A harmadik szinten a szimulátor egy adott nyomatási műveletet szimulál az aktuális időintervallumban. Először létrehoz egy Műveletindítás eseményt, majd meghatározza a nyomtatás sebességét. Sikeres végrehajtás után egy Tartályfeltöltés esemény generálódik. Ekkor a szimulátor ellenőrzi, hogy az adott intervallumban lefejtendő termékmennyiség rendelkezésre áll-e a forrástartályban. Ha igen, akkor a tartály lefejtésre kerül, és a lefejtett mennyiség levonásra kerül a tartály készletéből. Sikeres végrehajtás esetén egy új Csőfeltöltés esemény generálódik. Az aktuális nyomatási művelethez tartozó csőhálózat első csőve lesz az aktuális cső. Ennek a csőnek a bementére kerül az előző eseményben kifogadott termékmennyiség. Ha a cső feltöltése sikeresen végrehajtott, akkor létrejön egy új Csőletöltés esemény. Ebben az eseményben a szimulátor megkezdi a termék kifogadását a cső kimenetén. Érdeemes megjegyezni, hogy a csőben lévő termékek egy FIFO struktúrában kerülnek tárolásra. Csőfeltöltés esemény esetén a lista végére kerül a nyomtatott mennyiség, míg Csőletöltés esemény esetén a lista elejéből kerül kivonásra a kifogadott mennyiség. A Csőletöltés eseménynél a szimulátornak el kell döntenie, hogy a cső kimenetén lévő termék a cső végén lévő telephelyen kerül kifogadásra, vagy tovább kell szállítani egy másik csőbe. Ehhez meg kell vizsgálni a termék céltelephelyét, és ha ez egyezik az aktuális cső végén lévő telephellyel, akkor a szimulátor egy Tartályfeltöltés eseményt generál. Ellenkező esetben egy új Csőfeltöltés esemény jön létre a megfelelő csőhöz. A Tartályfeltöltés eseményben megkezdődik a tartály feltöltése a céltelephelyen. Ha van elég hely a tartályban, akkor a folyamat sikeresen befejeződik és nem

generálódik új esemény. Ezután már csak a nyomtatási műveletet kell frissíteni, vagyis a küldendő mennyiségből le kell vonni az elküldött mennyiséget, valamint a kezdési időt egy perccel el kell tolni.

A szigorú szimulációban a szimuláció azonnal megszakad, ha egy eseményhez tartozó tevékenység nem volt végrehajtható az alábbi problémák valamelyike miatt:

- A forrástartály foglalt.
- A forrástartályból kifogyott a termék.
- A használni kívánt cső foglalt.
- A használni kívánt csőben lévő termékek útvonala ellentétes a csőbe nyomtatott termékével.
- A céltartály foglalt.
- A céltartályt megtelt.

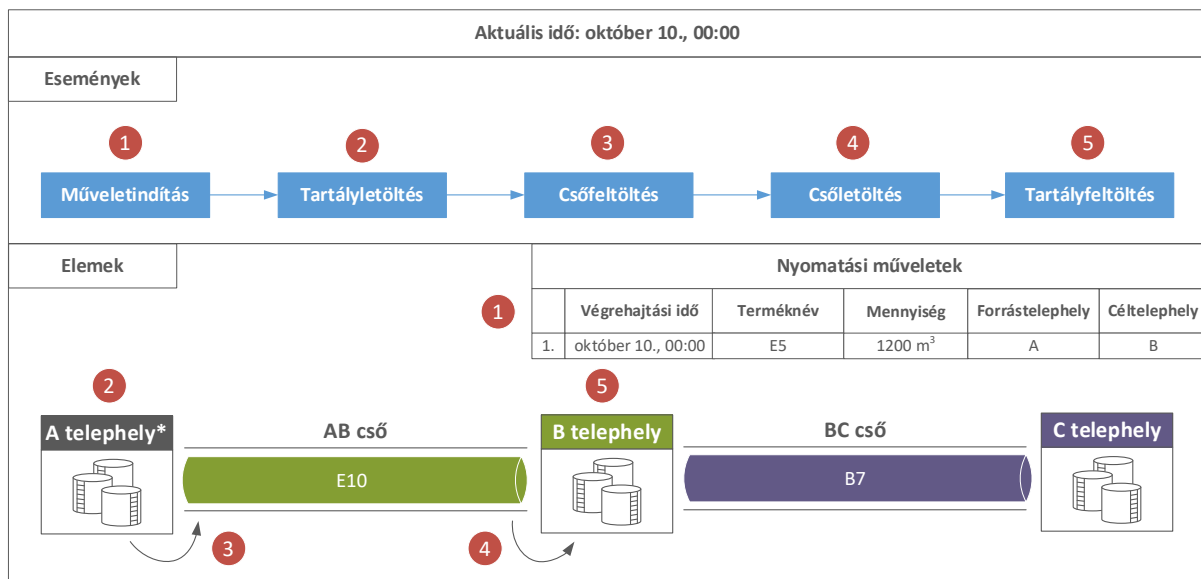
Ha hiba történt, akkor a rendszer értesíti az ütemezőt a probléma okáról, megjeleníti az érintett erőforrásokat és a hiba előfordulásának időpontját. A kapott információk alapján az ütemező módosítja a tervet, majd újra lefuttatja azt a szimulátorban.

5.1.3 Szimulációs eljárás bemutatása gyakorlati példákon keresztül

5.1.3.1 Egy cső közötti szimuláció

A 8. ábrán a szigorú szimulációs eljárás alapesete kerül bemutatásra, amelyben két szomszédos, telephely között történik E5 benzín szállítása az AB csövön keresztül. Az ábra felső részében láthatók a szimulációban lévő események, amelyek sikeres lefutást követően egy új eseményt generálnak (kék nyilak). Az eseményekhez egy-egy, az ábra alsó részén látható szimulációs elem van társítva számok segítségével. Minden telephely egyedi színnel van ábrázolva. A csövekben lévő termékek színe megegyezik a céltelephely színével. Amelyik telephely neve mellett egy csillag szerepel, ott egy nyomtatási művelet végrehajtása történik.

A vállalathoz egy új megrendelés érkezett, amelyet B telephelyen kell teljesíteni. Mivel B telephelyen nincsen elegendő készlet a kért termékből, így az ütemezők egy új nyomtatási műveletet vesznek fel, amely szerint 1200 m³ E5 benzint szállítanak az A telephelyről a B telephelyre. Ez a 8. ábra Nyomtatási műveletek szekciójában is látható.

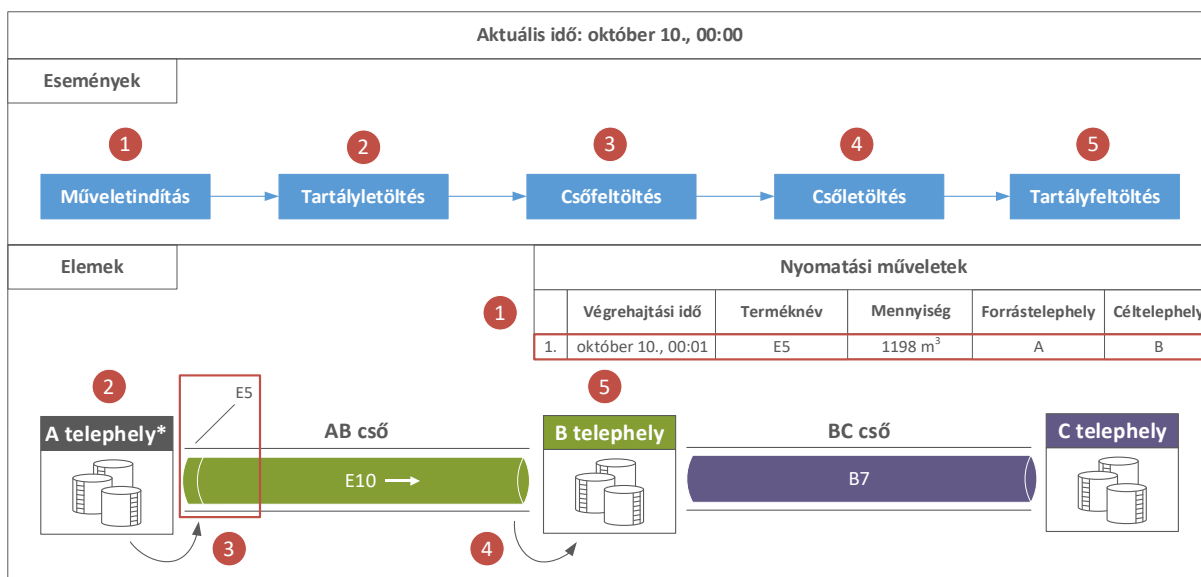


8. ábra. A szigorú szimuláció folyamata egy cső esetén az első perc elején.

A szigorú szimuláció lépései az 1. percben:

1. A szimulátor törli a rendszerben lévő csövek foglaltságát. A szimuláció első percében létrejön egy Műveletindítás esemény, amely szerint el kell kezdeni az E5 benzin befecskendezését. Ezután létrejön egy Tartályletöltés esemény.
2. A Tartályletöltés esemény hatására a szimulátor ellenőrzi, hogy az A telephelyen lévő E5 benzin tartálya nincs-e foglalta, valamint, hogy rendelkezésre áll-e elegendő mennyiség a termékből. Mivel most a tartály nincs zárva, valamint rendelkezésre áll megfelelő mennyiség a termékből, ezért a szimulátor levonja az egy perc alatt kifogadott mennyiséget (2 m³ E5 benzin) az aktuális tartálysztintből (12000 m³). Ezt követően egy új Csőfeltöltés eseményt generál az AB cső számára.
3. A Csőfeltöltés esemény hatására a szimulátor ellenőrzi, hogy foglalt-e az AB cső, és ha nem, akkor lefoglalja. A cső feltöltésének folyamata azzal kezdődik, hogy a tartályból kifogadott termék mennyiség (2 m³ E5 benzin) beszúrásra kerül az AB cső utolsó terméke (E10 benzin) után, majd a szimulátor egy új Csőletöltés eseményt generál.
4. A Csőletöltés esemény elindítja a cső letöltésének folyamatát a cső másik oldalán. A csőkészlet első eleméből (E10 benzin) levonja a benyomatott termékmennyiséget (2 m³). Mivel az E10 benzin céltelephelye a B telephely, így egy új Tartályfeltöltés esemény generálódik.
5. A Tartályfeltöltés esemény hatására a szimulátor ellenőrzi, hogy a B telephelyen lévő E10 benzin tartály nincs-e foglalta. Mivel nincs foglalta, és van elegendő szabad hely, ezért az eredeti tartálysztintet (2 m³-rel) növeli.

A 9. ábra a rendszer állapotát mutatja az első perc végén. Az 1. sorszámú nyomatási művelet frissítésre került és a befecskendezett E5-ös benzin megjelent az AB cső bal oldalán.



9. ábra. A szigorú szimuláció folyamata egy cső esetén az első perc végén.

A szimuláció következő percében az események a frissített cső- és tartálykészlet adatokkal futnak le. A folyamat addig ismétlődik, amíg a szimulációs idő véget nem ér. Az 1. táblázatban láthatók a szimulációban lévő tartályokhoz tartozó készletmennyiségek változásai. A szimulációs idő előrehaladásával az A telephelyen lévő E5 benzintartályból az termékmennyiség folyamatosan csökken (piros szín), míg a B telephelyen lévő E10 benzintartály szintje ezzel párhuzamosan nő (zöld szín).

1. táblázat. Tartálykészlet változások a szimulációban.

	A telephely			B telephely			C telephely		
Idő	E5 m ³	E10 m ³	B7 m ³	E5 m ³	E10 m ³	B7 m ³	E5 m ³	E10 m ³	B7 m ³
00:00	12000	1000	4000	100	1400	2000	10000	500	3800
00:01	11998	1000	4000	100	1402	2000	10000	500	3800
00:02	11996	1000	4000	100	1404	2000	10000	500	3800
00:03	11994	1000	4000	100	1406	2000	10000	500	3800
00:04	11992	1000	4000	100	1408	2000	10000	500	3800
		
01:00	11880	1000	4000	100	1520	2000	10000	500	3800

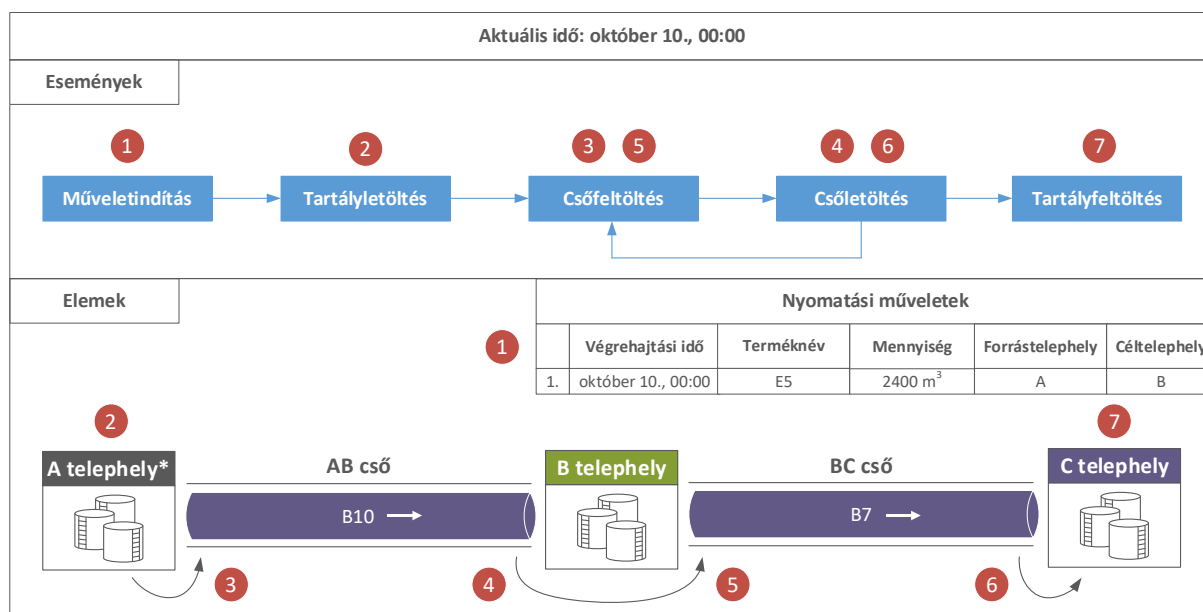
A 2. táblázatban láthatók a szimulációban lévő csövek készletmennyiségeinek változásai. A szimulációs idő előrehaladtával az AB csőben lévő E10 benzín mennyisége folyamatosan csökken, mivel kifogadásra kerül a B telephelyen. Ezzel szemben a cső másik oldalán nyomtatott E5 benzín mennyisége pedig folyamatosan nő, mivel az A telephelyen megkezdődött a csőbe történő nyomtatás.

2. táblázat. Csőkészlet változások a szimulációban.

AB cső				BC cső		
Idő	#	Terméknév	Menny. m ³	#	Terméknév	Menny. m ³
00:00	1.	E10	1200	1.	B7	1000
00:01	1.	E10	1198	1.	B7	1000
	2.	E5	2			
		
01:00	1.	E10	1080	1.	B7	1000
	3.	E5	120			

5.1.3.2 Több csövet érintő szimuláció

A 10. ábrán látható példában az az eset kerül bemutatásra, amelyben egy csőben lévő terméknek több csövön (AB, BC) is át kell mennie az A (forrástelephely) és a C (céltelephely) között. Hasonlóan az előző példához, most is egy új megrendelés érkezett, amelyet B telephelyen kell teljesíteni. Mivel B telephelyen nincsen elegendő mennyiség a kért termékből, így az ütemezők egy új nyomatási műveletet vesznek fel, amely alapján 2400 m³ E5 benzint szállítanak az A telephelyről a B telephelyre. Most az AB cső az előző példához képest más terméket (B10 dízelt) tartalmaz. A BC csőben pedig B7 dízel van, amelyet a C telephelyre kell szállítani.



10. ábra. Több csövet érintő szimuláció az első perc elején.

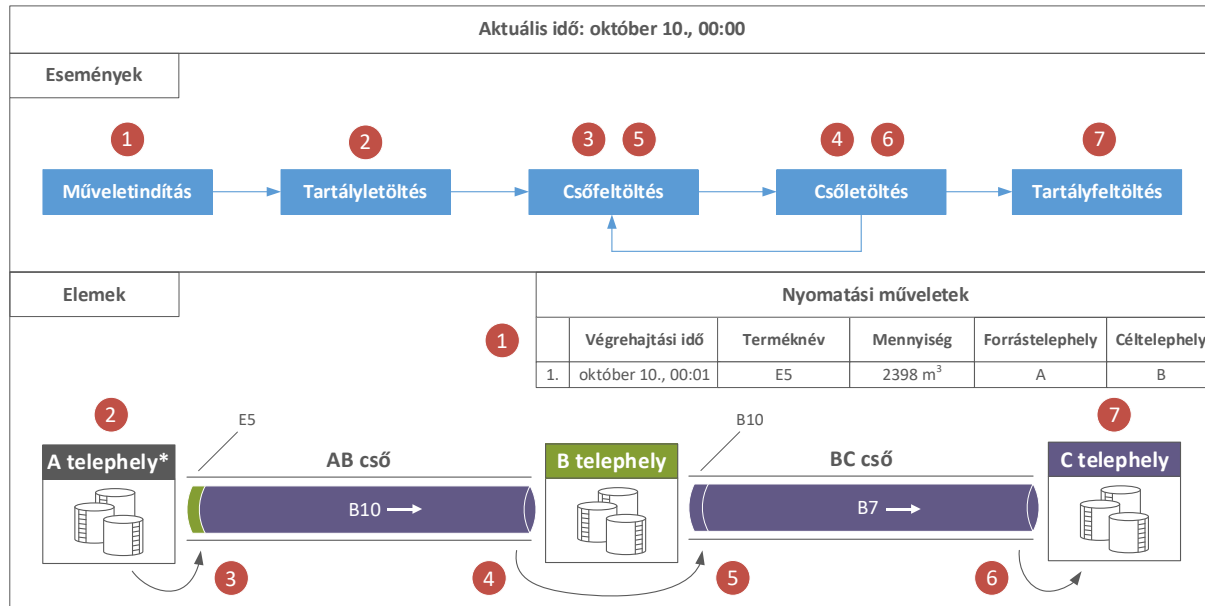
A szimuláció lépései az 1. percben:

1. A szimulátor egy előkészítő lépésben törli a rendszerben lévő csövek foglaltságát. A szimuláció első percében el kell kezdeni az E5 benzint szállítást, ezért létrejön a Műveletindítás esemény. Ezt követően egy új Tartályletöltés esemény generálódik.
2. A Tartályletöltés esemény hatására a szimulátor ellenőrzi, hogy foglalt-e az A telephelyen lévő E5 benzintartály, mivel nem, így lefoglalja. Ezt követően megvizsgálja, hogy rendelkezésre áll-e a

szükséges termékmennyiség. Kivonja a tartálykészletéből (12000 m³) az egy perc alatt kifogadott mennyiséget (2 m³ E5 benzin), végül egy új Csőfeltöltés eseményt generál az AB csőhöz.

3. A Csőfeltöltés esemény hatására a szimulátor először ellenőrzi, hogy foglalt-e az AB cső, ha nem, akkor lefoglalja. Ezt követően elindul a csőfeltöltés folyamata úgy, hogy az AB csőkészlethez hozzáadja a tartályból lefejtett termékmennyiséget (2 m³ E5 benzin), majd egy új Csőletöltés eseményt generál.
4. A Csőletöltés esemény elindítja a csőkifogadás folyamatát. A csőkészlet első eleméből (B10 dízel) kivonja a cső utolsó eleméhez (E5 benzin) hozzáadott termékmennyiséget (2 m³). Mivel az AB csőben lévő első B10 dízel céltelephelye (C) nem egyezik meg a cső végén lévő telephellyel (B), így egy új Csőfeltöltés esemény generálódik a BC csőhöz.
5. A Csőfeltöltés esemény hatására a szimulátor először ellenőrzi, hogy foglalt-e az BC cső, ha nem, akkor lefoglalja. Ezt követően elindul a csőfeltöltés folyamata úgy, hogy az előző csőből kivont termékmennyiséget (2 m³ B10 dízel) hozzáadja a csőkészlethez, majd egy új Csőletöltés eseményt generál.
6. A Csőletöltés esemény elindítja a csőkifogadás folyamatát. A csőkészlet első eleméből (B7 dízel) kivonja a cső utolsó eleméhez (B10 dízel) hozzáadott termékmennyiséget (2 m³). Mivel a B7 termék céltelephelye a C telephely, így egy Tartályfeltöltés esemény generálódik.
7. A Tartályfeltöltés esemény először lefoglalja céltartályt, majd elindítja a tartályfeltöltés folyamatát. A céltartály készletéhez (400 m³) hozzáadja az utolsó csőből kifogadott termékmennyiséget (2 m³).

A 11. ábra a rendszer állapotát mutatja az első perc végén. Az 1. sorszámú nyomtatási művelet frissítésre került és az E5-ös benzin megjelent az AB cső bal oldalán, az AB csőben lévő B10 dízel pedig megjelent a BC cső bal oldalán.



11. ábra. Több csövet érintő szimuláció az első perc végén.

A szimuláció következő percében hasonlóan hajtódnak végre az események a frissült cső- és tartálykészlet adatokkal. A folyamat addig ismétlődik, amíg végre nem hajtódik az összes nyomtatási művelet az ütemezési tervben. A 3. táblázatban láthatók a szimulációban lévő tartályokhoz tartozó készletmennyiségek változásai. A szimulációs idő előrehaladásával az A telephelyen lévő E5 benzintartály szintje folyamatosan csökken (piros színnel) míg a C telephelyen lévő B7 dízel tartály

szintje (később a B10 dízel tartály szintje) ezzel párhuzamosan nő (zöld színnel). Ez a folyamat egészen addig tart amíg, az AB csőben lévő E5 benzin a cső végéhez nem ér (600 perc). Ekkor a csővezeték operátorok elzárják a BC csőhöz vezető szelepet és megkezdődik az E5 benzin kifogadása a B telephelyen. Ekkor a BC csőben lévő B10 dízelt már semmilyen termék nem tolja, így ez a cső ideiglenesen leáll.

3. táblázat. Tartálykészlet változások a szimulációban.

Idő	A telephely			B telephely			C telephely		
	E5 m ³	E10 m ³	B10 m ³	E5 m ³	E10 m ³	B7 m ³	E5 m ³	B7 m ³	B10 m ³
00:00	12000	1000	4000	100	1400	2000	10000	400	800
00:01	11998	1000	4000	100	1400	2000	10000	402	800
00:02	11996	1000	4000	100	1400	2000	10000	404	800
00:03	11994	1000	4000	100	1400	2000	10000	406	800
00:04	11992	1000	4000	100	1400	2000	10000	408	800
		
01:00	11880	1000	4000	100	1400	2000	10000	520	800
		
10:00	10800	1000	4000	100	1400	2000	10000	1400	1000
		
15:00	10200	1000	4000	700	1400	2000	10000	1400	1000

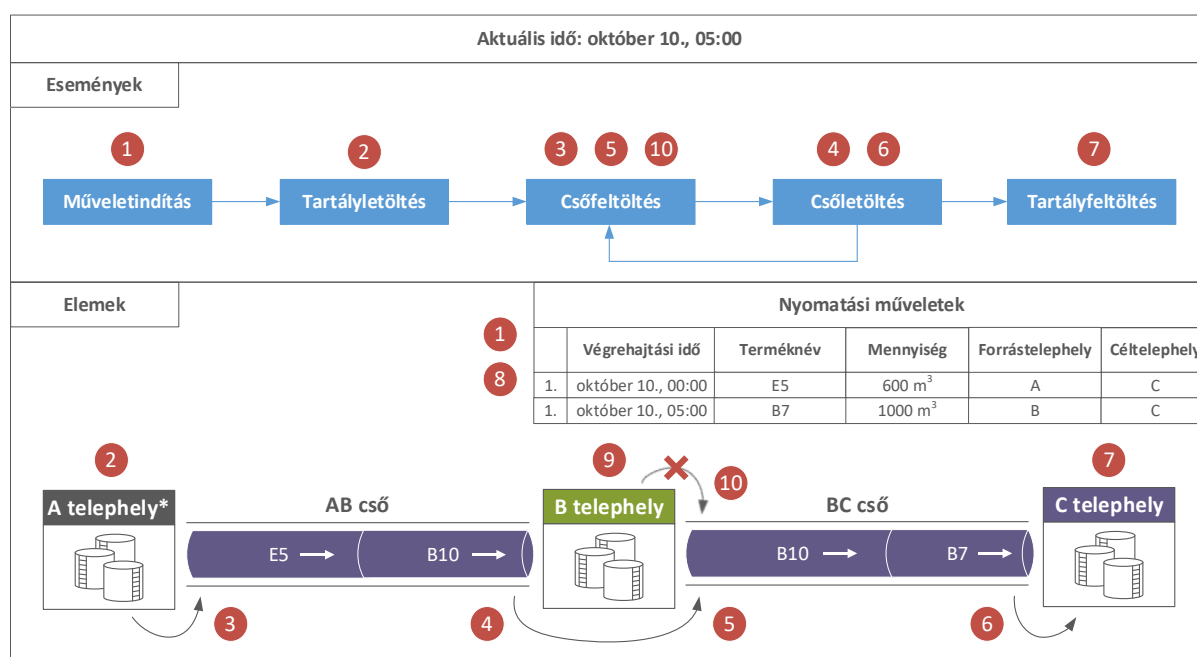
A 4. táblázatban láthatók a szimulációban lévő csövek készletmennyiségeinek változásai. A szimulációs idő előrehaladtával az AB csőben lévő B10 dízel mennyisége folyamatosan csökken, mivel tovább áramlik a BC csőbe. A BC csőben lévő B7 dízel mennyisége szintén csökken, mivel kifogadásra kerül a C telephelyen. Ezzel párhuzamosan az AB csőben lévő E5 benzin mennyisége folyamatosan nő, mivel az A telephelyen elkezdtek azt a csőbe nyomtatni. Mivel az AB csőből a BC-be áramlik a termék, így a BC csőben lévő B10 dízel mennyisége is nő. Ez a folyamat egészen addig folytatódik amíg az AB csőből ki nem ürül a B10 dízel (600 perc). Ekkor elzárják az AB és BC csövet összekötő szelepet, hogy megkezdődhessen az E5 benzin kifogadása a B telephelyen. Ezt követően az AB cső tartalmában már nem lesz változás, mivel ugyanakkora mennyiségű E5 benzin kerül be a csőbe az A telephelyen, mint amekkora mennyiségű E5 benzin kerül kifogadásra a B telephelyen. Ugyanez igaz a BC csőben lévő termékekre is, mivel az összekötő szelep lezárását követően már nem fog érkezni termék az A telephelyről, amely tovább nyomná a BC csőben lévő terméket a céltelephely irányába.

4. táblázat. Csőkészlet változások a szimulációban.

AB telephely				BC telephely		
Idő	#	Terméknév	Menny. m ³	#	Terméknév	Menny. m ³
00:00	1.	B10	1200	1.	B7	1000
00:01	1.	B10	1198	1.	B7	998
	2.	E5	2	2.	B10	2
		
01:00	1.	B10	1080	1.	B7	880
	2.	E5	120	2.	B10	120
		
10:00	1.	E5	1200	1.	B10	1000

5.1.3.3 Erőforrásütközés detektálása a szimulációban

A 12. ábrán látható példában egy olyan eset kerül bemutatásra, ahol azonos időpillanatban azonos erőforrást (BC csövet) használna két nyomatási művelet. A tervezési időszakban több igény is beérkezett (1200 m³ benzin E5 és 1000 m³ B7 dízel), amelyek kiszolgálását az A és B telephelyek segítségével lehet megvalósítani. Azonban az ütemező a második nyomatási műveletet túl korai időpontra vette fel (lásd 12. ábra Nyomatási műveletek szekció), amely később erőforrásütközéshez vezet.



12. ábra. Erőforrásütközés detektálása a szimuláció 300. percében.

A szimuláció lépései a 300. percben:

1. A szimulátor törli a rendszerben lévő csövek foglaltságát. Mivel a szimuláció 300. percében tovább kell folytatni az E5 benzin nyomtatását, így létrejön a Műveletindítás esemény. Ezt követően egy új Tartályletöltés esemény generálódik.

2. A Tartályfeltöltés esemény hatására a szimulátor ellenőrzi, hogy foglalt-e az A telephelyen lévő E5 benzintartály, mivel nem, így lefoglalja. Ezt követően megvizsgálja, hogy rendelkezésre áll-e a szükséges termékmennyiség. Kivonja a tartálykészletéből (11400 m³) az egy perc alatt kifogadott mennyiséget (2 m³ E5 benzin), végül egy új Csőfeltöltés eseményt generál az AB csőhöz.
3. A Csőfeltöltés esemény hatására a szimulátor ellenőrzi, hogy foglalt-e az AB cső, ha nem, akkor lefoglalja. Ezt követően elindul a csőfeltöltés folyamata úgy, hogy az AB csőkészlet utolsó eleméhez (E5 benzin) hozzáadja a tartályból kifogadott termékmennyiséget (2 m³ E5 benzin), majd egy új Csőfeltöltés eseményt generál.
4. A Csőfeltöltés esemény elindítja a csőkifogadás folyamatát. A csőkészlet első eleméből (B10 dízel) kivonja a cső utolsó eleméhez (E5 benzin) hozzáadott termékmennyiséget (2 m³). Mivel az AB csőben lévő B10 dízel céltelephelye (C) nem egyezik meg a cső végén lévő telephellyel (B), így egy új Csőfeltöltés esemény generálódik a BC csőhöz.
5. A Csőfeltöltés esemény hatására a szimulátor ellenőrzi, hogy foglalt-e a BC cső, ha nem, akkor lefoglalja. Ezt követően elindul a csőfeltöltés folyamata úgy, hogy az előző csőből kivont termékmennyiséget (2 m³ B10 dízel) hozzáadja a csőkészlet utolsó eleméhez (B10 dízel), majd egy új Csőfeltöltés eseményt generál.
6. A Csőfeltöltés esemény elindítja a csőkifogadás folyamatát. A csőkészlet első eleméből (B7 dízel) kivonja a cső utolsó eleméhez (B10 dízel) hozzáadott termékmennyiséget (2 m³). Mivel a csőben lévő első B7 dízel céltelephelye a C telephely, így generálódik egy új Tartályfeltöltés esemény.
7. A Tartályfeltöltés esemény lefoglalja a céltartályt, majd elindítja a tartályfeltöltés folyamatát. A céltartály készletéhez (1000 m³) hozzáadja az utolsó csőből kifogadott termékmennyiséget (2 m³).
8. Létrejön egy új Műveletindítás esemény, mivel a második nyomtatást ebbe az időszakban kell elkezdeni.
9. A Tartályfeltöltés esemény hatására a szimulátor ellenőrzi, hogy foglalt-e a B telephelyen lévő B7 dízel tartály, ha nem, akkor lefoglalja. Ezt követően megvizsgálja, hogy rendelkezésre áll-e a szükséges termékmennyiség. Ha igen akkor kivonja a tartálykészletéből (2000 m³) a kifogadott mennyiséget (2 m³ B7 dízel), végül egy új Csőfeltöltés eseményt generál a BC csőhöz.
10. A Csőfeltöltés esemény hatására a szimulátor ellenőrzi, hogy foglalt-e a BC cső. Mivel az adott időlépésben az első nyomtatási művelet már lefoglalta a BC csövet, így a szimuláció megszakad.

A szimuláció megszakadásakor a rendszer értesíti a felhasználót az ütközésről, majd megjeleníti azokat az információkat (ütközés pontos ideje, érintett erőforrások), amelyek szükségesek a terv módosításához. Az egyik lehetséges javítás az, ha az ütemező úgy módosítja a tervet, hogy a második nyomtatási művelet csak azután induljon, miután az első befejeződik.

Egy ilyen kisméretű példa esetén könnyű észrevenni, hogy a terv hibás, hiszen a második nyomtatás hamarabb kezdődik el, mint ahogy az első nyomtatási művelet befejeződne. Ez azért okoz problémát, mivel az első nyomtatási művelet prioritásban magasabban helyezkedik el, mint a második, és minden időpillanatban lefoglalja a BC csövet, amíg be nem fejeződik a művelet. Emiatt az ütemezőnek második nyomtatási művelet később indítania, amikor az első nyomtatási művelet már befejeződött. A gyakorlatban mind a tervek, mind a csőhálózat sokkal bonyolultabb, így nem triviális annak megállapítása, hogy egy terv megvalósítható vagy sem.

5.2 Időeltolódásos szimuláció

A szimulátorban lehetőség van az ütemezési tervek időeltolódásos szimulációjára is. Ez akkor hasznos, ha az ütemezés csak kisebb hibákat tartalmaz. Ezeket a hibákat a szimulátor megpróbálja javítani. A gyakorlatban ez úgy történik, hogy bizonyos hibák esetén nem áll le a szimuláció, hanem a

nyomatási művelet időpontját egy perccel eltolja. A következő percben újra megpróbálja végrehajtani az adott nyomatási műveletet, és ha akkor sem lehet végrehajtani, akkor ismét eltolja. Ha eltolást kellett alkalmaznia a szimulátornak, akkor az eredeti terv nem megvalósítható, ugyanakkor az ütemező konkrét javaslatot kap az ütemezési terv módosítására.

5.2.1 *Eltérések a szimulációs folyamatok között*

Az időeltolós szimuláció a harmadik szinten tér el a szigorú szimulációtól. Az időeltolós szimuláció pszeudó kódja a 13. ábrán látható.

```

1  EI létrehozása // EI az elemi időintervallumok halmaza
2  Ciklus ei ∈ EI
3      Csőfoglalások törlése
4      NYM létrehozása // NYM a nyomatási műveletek halmaza ei-ben
5      Ciklus nym ∈ NYM
6          Másolat létrehozása az erőforrásokról
7          E létrehozása = {Műveletindítás} // E az események verme
8          Nyomatási műveletben lévő termék áramlási sebességének meghatározása
9          Ciklus amíg E ≠ 0
10             e = E.Kivesz() // E legfelső eseményének kiválasztása
11             Ha e végrehajtható akkor
12                 e végrehajtása // Ehhez szükséges a korábban meghatározott áramlási sebesség
13                 Ha e típusa nem Tartályfeltöltés akkor
14                     e' létrehozása
15                     E.Berak(e') // Új esemény hozzáadása E-hez
16                 Elágazás vége
17             Különben
18                 nym eltoltása a következő ei-re
19                 Erőforrások visszaállítása a Műveletindítás esemény előtti állapotra
20             Elágazás vége
21         Ciklus vége
22     nym frissítése // Kezdési idő, termékmennyiség
23     Ciklus vége
24     Ciklus vége

```

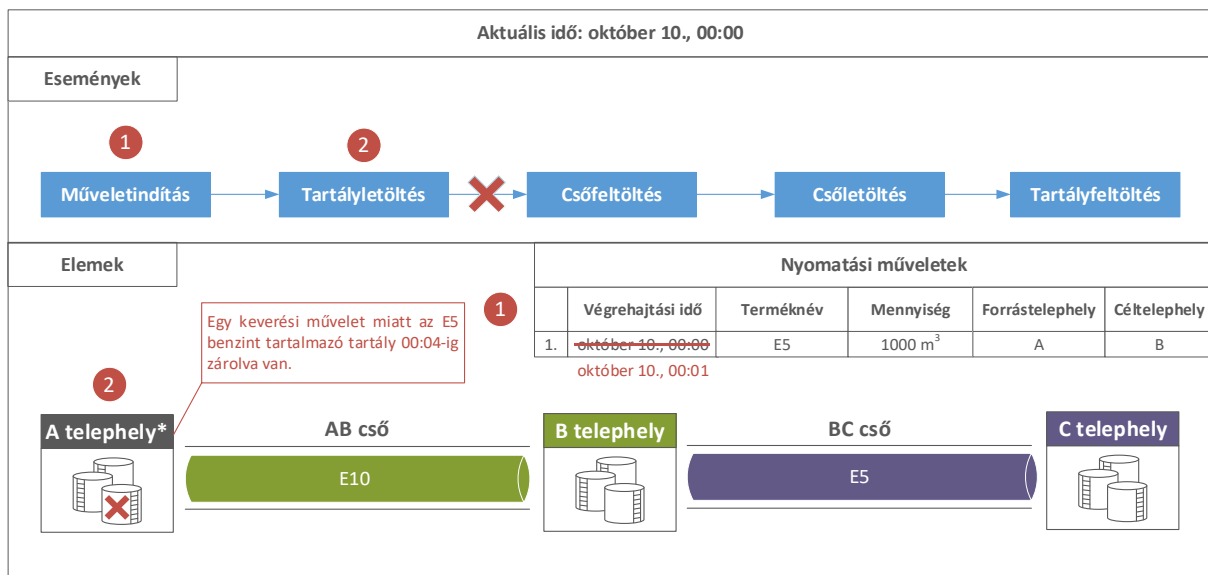
13. ábra. Az időeltolós szimuláció működésének pszeudó kódja.

A harmadik szinten a szimulátor először egy biztonsági másolatot készít az erőforrásokról, majd ezt követően egymás után próbálja szimulálni az adott időintervallum nyomatási műveleteit. Egy nyomatási művelet szigorú szimulációban azonnal megszakadt, ha egy eseményhez tartozó tevékenység nem volt végrehajtható. Időeltolós szimuláció használatakor az adott nyomatási művelet végrehajtási ideje a következő időintervallumra tolódik át. Az időeltolás a következő időintervallumban is megismétlődik, ha a probléma még akkor is fennáll. Egy nyomatási művelet eltolásakor az erőforrások állapota a kezdő esemény előtti állapotra kerülnek visszaállításra.

5.2.2 *Nyomatási műveletek eltolásának bemutatása példával*

5.2.2.1 *Ha foglalt vagy üres a forrástartály*

A 14. ábrán látható példában az az eset kerül bemutatásra, amikor a forrástartály alacsony szintje miatt nem tud időben elkezdődni egy nyomatási művelet. Egy új megrendelés érkezett, amelyet B telephelyen kell teljesíteni. Mivel a B telephelyen nincs elegendő készlet a kért termékből, így az ütemezők egy új nyomatási műveletet vesznek fel, amelyben 1000 m³ E5 benzint kell szállítani az A telephelyről a B telephelyre.



14. ábra. Nyomatási művelet kezdési idejének eltolása egy keverési művelet miatt.

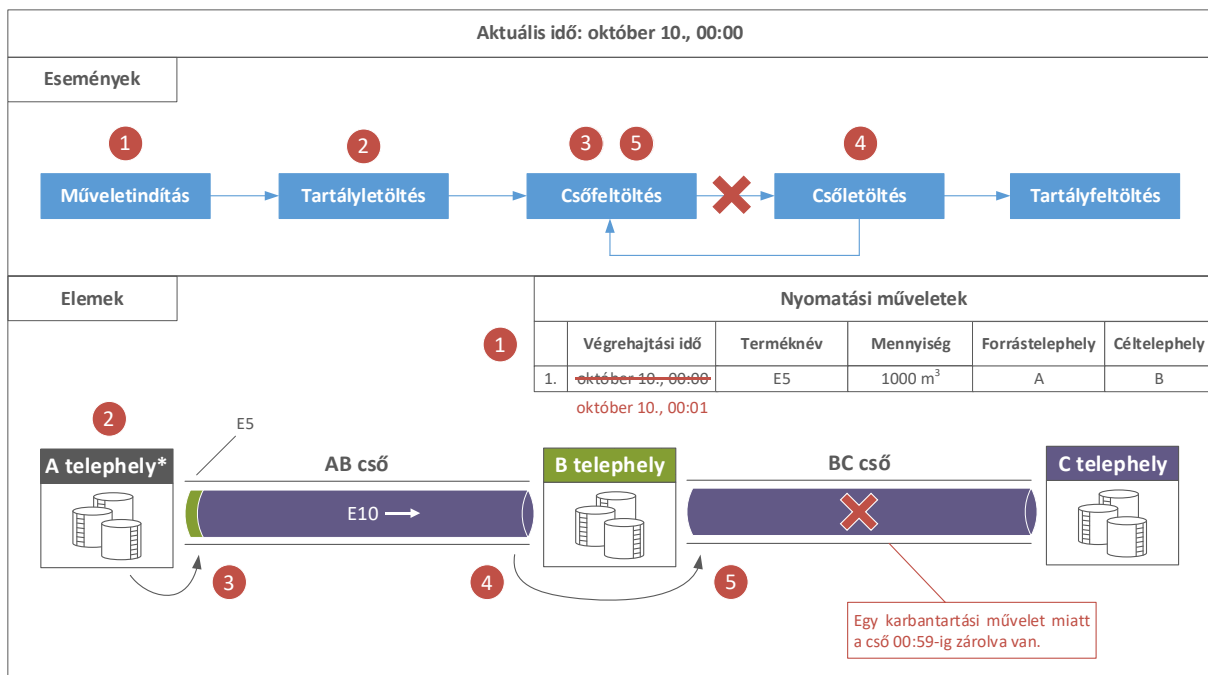
A szimuláció lépései az 1-4. percben:

1. Először a szimulátor törli a rendszerben lévő csövek foglaltságát. A szimuláció első percében el kell kezdeni az E5 benzint nyomatását, így létrejön a Műveletindítás esemény, amely egy Tartályletöltés eseményt generál.
2. A Tartályletöltés esemény hatására a szimulátor ellenőrzi, hogy az A telephelyen lévő E5 benzintartály nincs-e foglaltva, valamint, hogy rendelkezésre áll-e elegendő mennyiség a termékből. Mivel egy keverési művelet miatt zárolva van a tartály, ezért a szimulátor a nyomatási művelet kezdési idejét egy perccel eltolja, valamint visszaállítja a rendszer állapotát a Műveletindítás esemény előtti állapotra. Ennél a konkrét példánál nem történt állapotváltozás, így a visszaállítás során sincs változás.

A nyomatási művelet elcsúsztatása megismétlődik a 2., 3. és 4. percben is. Miután a szimuláció 5. percében a keverési művelet befejeződött és az A telephelyen lévő E5 benzintartály szabaddá vált a nyomatási művelet ezt követően végrehajtható.

5.2.2.2 Ha foglalt a cső

A 15. ábra azt mutatja be, amikor egy lefoglalt cső miatt nem tud folytatódni egy nyomatási művelet. Új igények miatt 1000 m³ E5 benzint kell szállítani az A telephelyről B telephelyre.



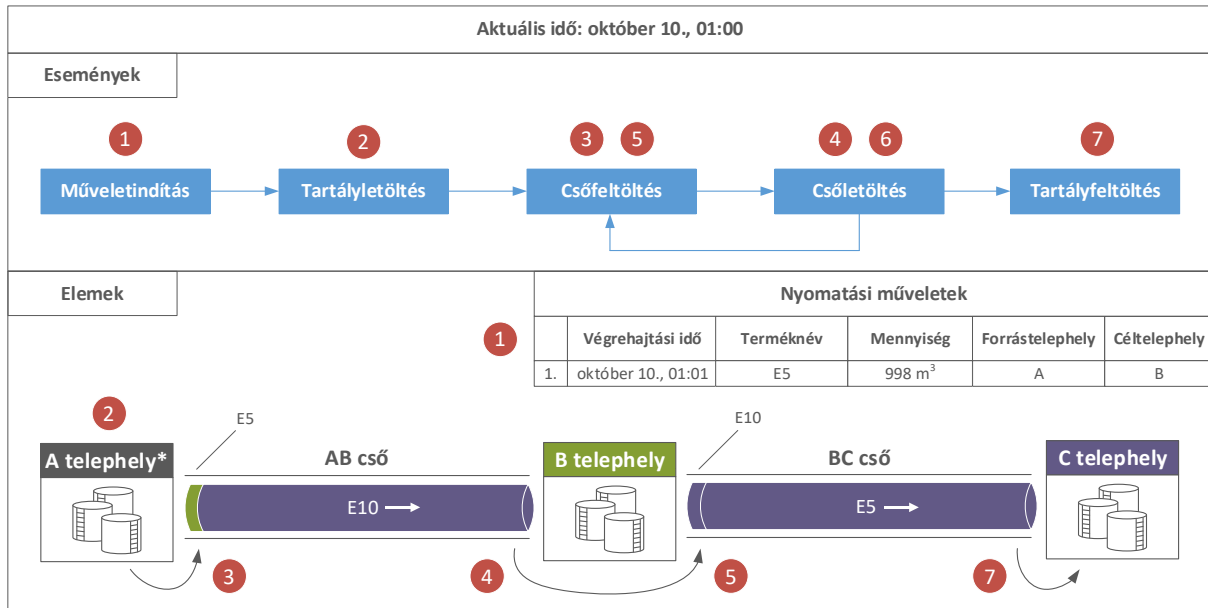
15. ábra. Nyomatási művelet kezdési idejének eltolása csőfoglaltság miatt.

A szimuláció lépései az 1-59. percekben:

1. A szimulátor törli a rendszerben lévő csövek foglaltságát. A szimuláció első percében el kell kezdeni az E5 benzin nyomatását, így létrejön egy Műveletindítás esemény, amely egy Tartályletöltés eseményt generál.
2. A Tartályletöltés esemény hatására a szimulátor ellenőrzi, hogy az A telephelyen lévő E5 benzin tartály nincs-e foglalta, valamint, hogy rendelkezésre áll-e elegendő mennyiség a termékből. Mivel a tartály nincs zárolva, valamint rendelkezésre áll megfelelő mennyiség a termékből, ezért a szimulátor levonja az egy perc alatt kifogadott mennyiséget (2 m³ E5 benzin) az aktuális tartálysztintből (2000 m³). Ezt követően egy új Csőfeltöltés eseményt generál az AB cső számára.
3. A Csőfeltöltés esemény hatására a szimulátor ellenőrzi, hogy foglalt-e az AB cső, és mivel nem, lefoglalja azt. A cső feltöltésének folyamata azzal kezdődik, hogy a tartályból kifogadott termékmennyiség (2 m³ E5 benzin) az AB cső utolsó terméke (E10 benzin) után kerül be, majd a szimulátor egy új Csőletöltés eseményt generál.
4. A Csőletöltés esemény elindítja a csőkifogadás folyamatát. A csőkészlet első eleméből (E10 benzin) levonja a cső utolsó termékéhez (E5 benzin) hozzáadott termékmennyiséget (2 m³). Mivel az E10 benzin céltelephelye a C telephely, így egy új Csőfeltöltés esemény generálódik.
5. A Csőfeltöltés esemény hatására a szimulátor ellenőrzi, hogy foglalt-e az BC cső. Mivel egy karbantartási művelet miatt zárolva van a BC cső, ezért a szimulátor a nyomatási művelet kezdési idejét egy perccel eltolja, törli az aktuális Csőfeltöltés eseményt, végül visszaállítja a rendszer állapotát a Műveletindítás esemény előtti állapotra.

Az előbb említett ciklus a következő percekben is meg fog ismétlődni. A szimuláció 59. percében a BC cső karbantartási művelete befejeződik, ezért a következő perctől az AB csőben lévő E10 benzin tovább tud áramolni a BC csőbe. A 16. ábrán látható, hogy 60. perctől a szimuláció lépései az 5. lépéstől kezdve térnek el az előzőktől:

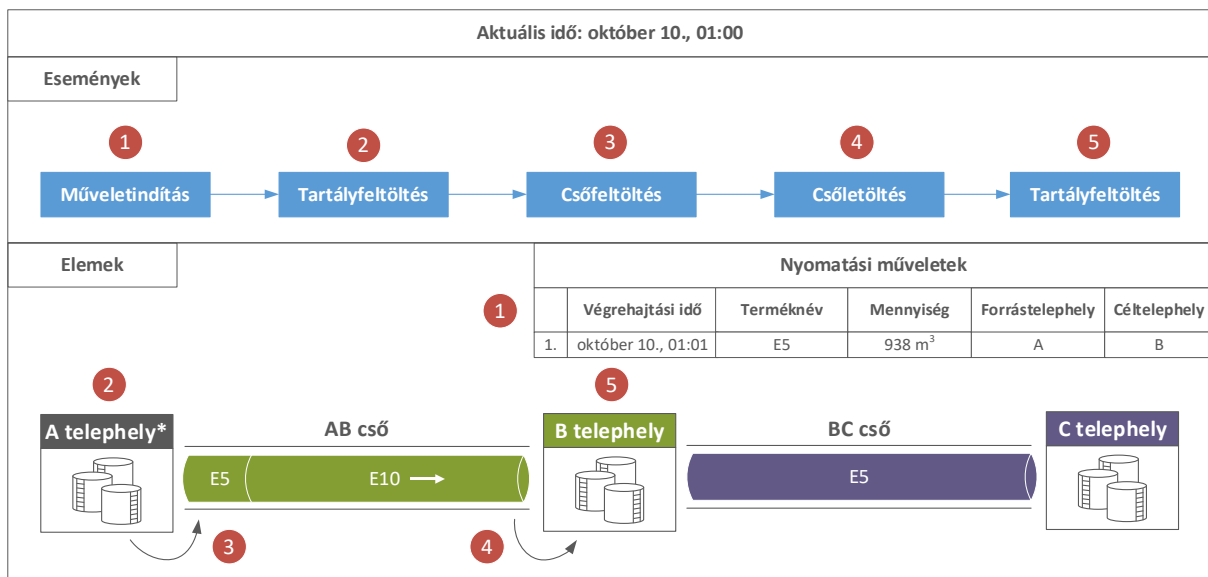
5. A Csőfeltöltés esemény hatására a szimulátor ellenőrzi, hogy foglalt-e a BC cső, és mivel nem, lefoglalja azt. Az előző AB csőből kifogadott termék mennyiség (2 m^3 E10 benzin) beszúrára kerül a BC cső utolsó termékéhez (E5 benzin), majd a szimulátor egy új Csőletöltés eseményt generál.
6. A Csőletöltés esemény elindítja a csőkifogadás folyamatát. A csőkészlet első eleméből (E5 benzin) levonja az előző eseményben hozzáadott termékmennyiséget (2 m^3 E10 benzin). Mivel az E5 benzin céltelephelye a C telephely, így egy új Tartályfeltöltés esemény generálódik.
7. A Tartályfeltöltés esemény hatására a szimulátor ellenőrzi, hogy a C telephelyen lévő E5 benzin tartály nincs-e foglalta. Mivel nincs, és van elegendő szabad hely, így a tartálszintet (2 m^3 -el) növeli.



16. ábra. A szimuláció folyamata a hatvanadik perc végén.

5.2.2.3 Ha foglalt vagy tele van a céltartály

A 17. ábra azt mutatja, amikor egy céltartály telítettsége miatt, nem tud végrehajtódni egy nyomatási művelet. Új igények miatt 1000 m^3 E5 benzint kell szállítani A telephelyről B telephelyre.

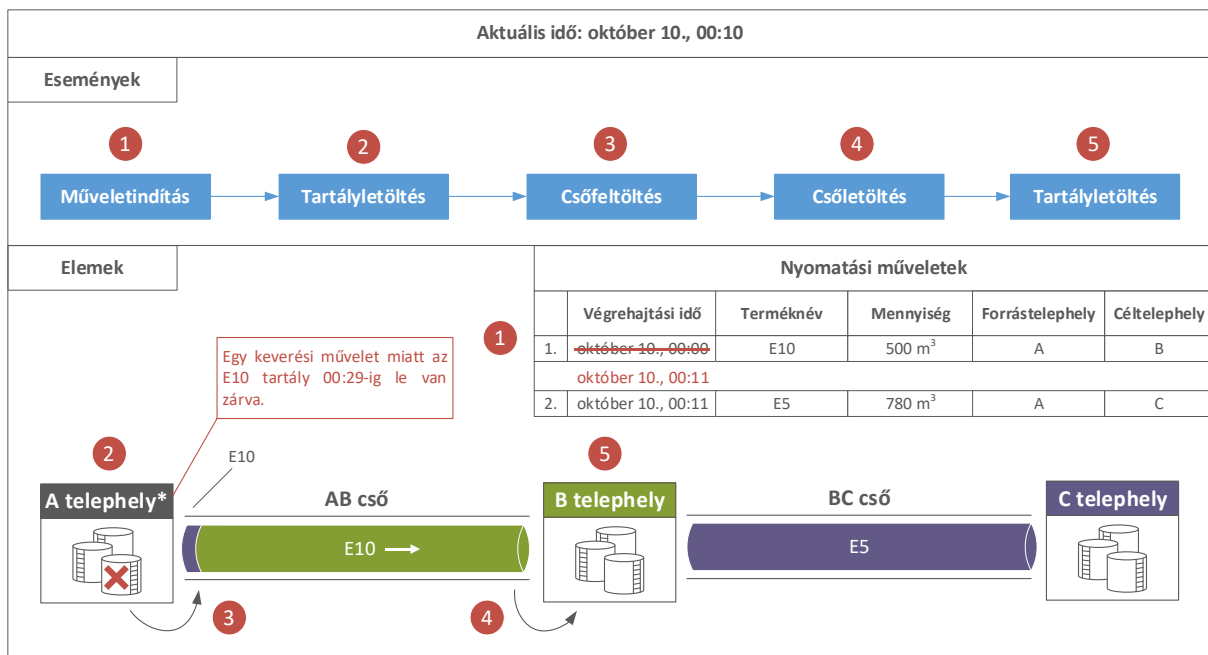


18. ábra. A szimuláció folyamata a hatvanadik perc végén.

5.2.3 Nyomatási műveletek szakaszos végrehajtásának bemutatása

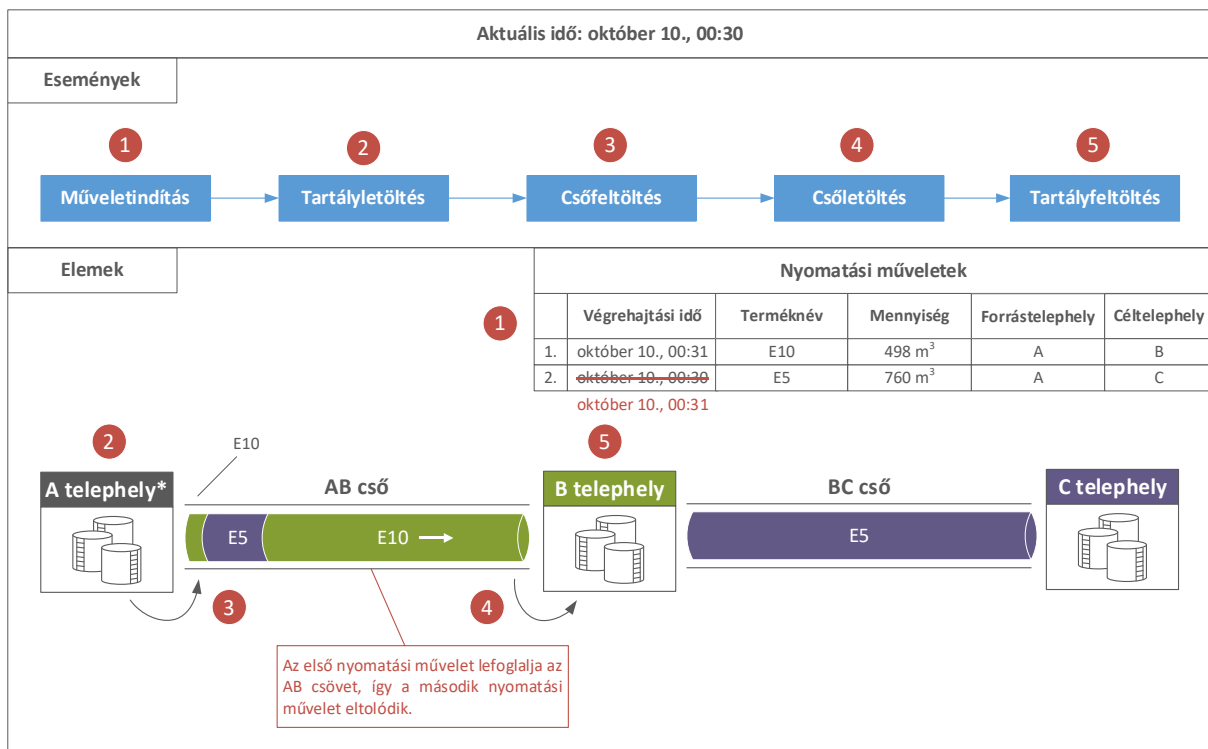
Az időeltolások szimuláció hasznos segítség az ütemezők számára, de használata olyan nem várt helyzetet eredményezhet, amelyekre előre fel kell készülni. A nyomatási műveletek végrehajtási sorrendjét az ütemezési terv határozza meg. Időeltolások szimuláció esetén előfordulhatnak azonban olyan esetek, ahol a szimulátor nem követi az eredeti sorrendet, illetve több nyomatási művelet csak szakaszosan kerül végrehajtásra. A 19. ábrán látható egy olyan eset, amikor az első nyomatási művelet nem tud időben elkezdődni egy elhúzódtott keverési művelet miatt, azonban egy második nyomatási művelet igen.

Új igények miatt 500 m³ E10 benzint kell szállítani az A telephelyről a B telephelyre, valamint 800 m³ E5 benzint kell szállítani az A telephelyről a C telephelyre. Mivel az A telephelyen lévő E10 benzintartály egy keverési művelet miatt zárva van, ezért a szimulátor az első nyomatási művelet kezdési idejét egy perccel eltolja. Ez még kilencszer megismétlődik. A szimuláció 11. percében az első nyomatási művelet még mindig blokkolva van, de a második nyomatási művelet végrehajtása aktuálissá válik. A 19. ábra a rendszer állapotát mutatja a tizenegyedik perc végén.



19. ábra. A nyomatási műveletek szakaszos végrehajtása a szimuláció tizenegyedik perc végén.

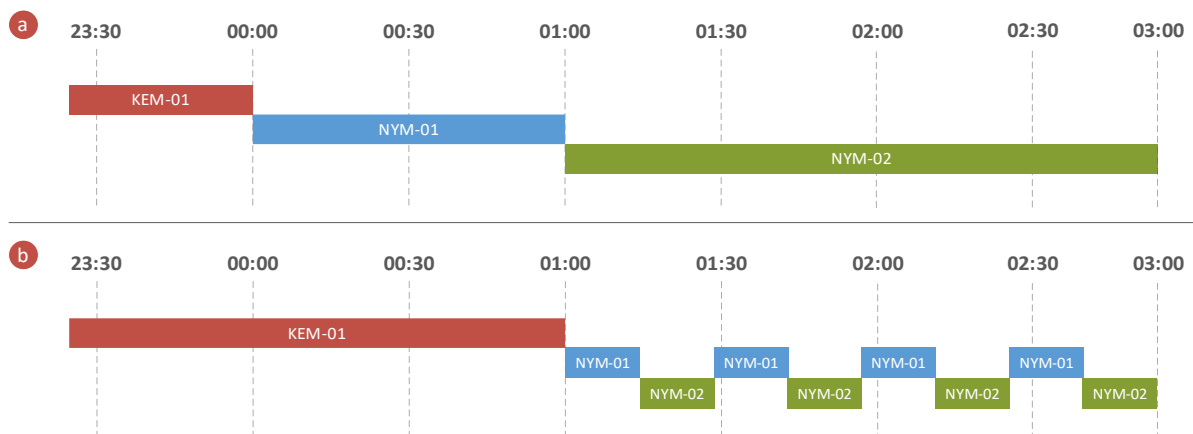
A 11. perctől a 29. percig az első nyomatási művelet blokkolva van, de a másodikat végre lehet hajtani. A 30. percben szimulátor újra megpróbálja végrehajtani az első nyomatási műveletet. Az E10 benzintartály most már elérhető, mivel befejeződött a keverési művelet, ezért végrehajtható az első nyomatási művelet. Ezt követően a szimulátor a második nyomatási műveletet is végre akarja hajtani az adott időintervallumban. A második nyomatási művelet azonban ugyanazt a csövet használná, mint az első, ezért most a második nyomatási művelet szakad félbe, és a maradék rész kezdési ideje egy perccel eltolódik. Mivel az első nyomatási művelet előrébb helyezkedik el a nyomatási tervben, mint a második, ezért neki precedenciája van. A második nyomatási művelet addig lesz eltolva újabb egy perccel, amíg nem keletkezik az első nyomatási műveletnél valamilyen nem várt esemény, vagy be nem fejeződik a művelet. A 20. ábra a rendszer állapotát mutatja a 30. perc végén.



20. ábra. A nyomatási műveletek szakaszos végrehajtása a harmincadik perc végén.

5.2.4 Az időeltolódásos szimuláció korlátjainak bemutatása

Érdemes megjegyezni, hogy előfordulhat olyan eset, amikor két vagy több nyomatási művelet feldarabolja egymást. A 21. ábra (a) részében látható egy előzetes ütemezési terv, ahol a KEM-01 számú keverési művelet 00:00 kor ér véget. Ezt követi a NYM-01 számú nyomatási művelet, amely kiszolgálása ugyanazon tartályból történik. A NYM-01 számú nyomatási művelet befejezését követően 01:00-kor megkezdődik a NYM-02 számú nyomtái művelet végrehajtása.



21. ábra. Két nyomatási művelet végrehajtásának feldarabolódása.

A 21. ábra (b) részében az látható, hogy a KEM-01 számú keverési művelet 00:00 helyett csak 01:00-kor fejeződik be. Ez azt eredményezi, hogy a NYM-01 számú nyomatási művelet végrehajtása csak egy órával később 01:00-kor kezdődhet meg. Az eltolás miatt NYM-01 és NYM-02 nyomatási művelet kezdési ideje azonos lesz. Amikor 01:00-kor elkezdődik a NYM-01 nyomatási művelet újabb probléma adódik. A céltartály ürítése lassabb, mint a feltöltés, ezért egy bizonyos idő után a céltartály

megtelik. A szimulátor ekkor a NYM-01 jelű nyomatási műveletet felfüggeszti és a kezdési idejét egy perccel eltolja. Ekkor a NYM-02 jelű nyomatási művelet el tud kezdődni, mert a NYM-01 nyomatási művelet nem veszi el tőle a csövet. Mivel a NYM-01 számú nyomatási művelethez tartozó céltartály ürítése folyamatos, így egy bizonyos idő után a szimulátor újra el tudja kezdeni a nyomatási tervben előbb szereplő NYM-01-es nyomatási művelet. Ekkor a szimulátor felfüggeszti és egy perccel eltolja a NYM-02 számú nyomatási művelet. Egy idő után a NYM-01 nyomatási művelethez tartozó céltartály újra megtelik. Ekkor újra a NYM-02 nyomatási művelet lesz aktív, és a váltakozás ismétlődik. Egy ilyen terv gyakorlati szempontból nem praktikus, ezért a szimulátor hibát jelez.

6.A szimulációs modell továbbfejlesztése

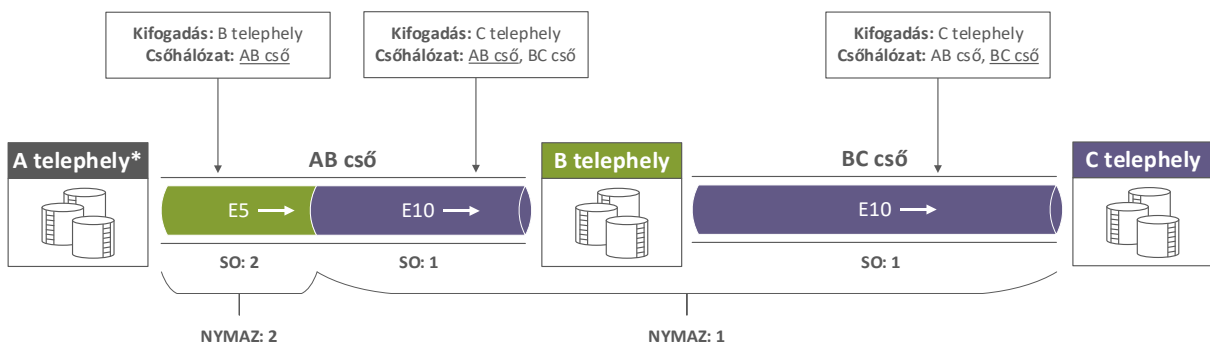
6.1 Útvonalmódosítás

A szimulációs modell korábbi verziójában jelentős korlát volt, hogy a már csőben lévő termék csőhálózatát nem lehetett megváltoztatni. A gyakorlatban azonban előfordulhat olyan eset, amikor a termék rendeltetési helyét meg kell változtatni, vagy a terméket több részre kell osztani, és a részeket különböző telephelyekre kell szállítani. Például, ha egy cső megsérül, akkor a korábbi ütemezési terv már nem hajtható végre. A szimulációs modell továbbfejlesztése lehetővé tette, hogy kezelni lehessen ezeket az eseteket.

6.1.1 Termékek modellezése a csövekben

6.1.1.1 Termékek elhelyezkedése a csövekben

Az ütemezők a telephelyi igények kielégítéséhez ütemezési tervet készítenek, amely különböző nyomatási műveleteket tartalmaz. Egy nyomatási művelet egy termék megfelelő időben és helyen történő csőbetöltését jelenti. Amikor egy termék bekerül a csőbe, akkor a nyomatási művelet azonosítója (NYMAZ) mellett kap egy csőhálózatot és egy sorszámot (SO). A csőhálózat határozza meg azon csövek sorrendjét, amelyen a terméknek végig kell haladnia, a sorszám pedig a csőben lévő termékek sorrendjét jelöli. Ha egy új termék kerül be egy csőbe, akkor a sorszáma a csőben lévő utolsó termék sorszámánál egyel nagyobb lesz. Ha elhagyja a termék az adott csövet, akkor a csőben lévő összes termék sorszáma egyel csökken. A 22. ábrán egy példa látható a termékek sorszámaira. Az ábrán három telephely látható, különböző színekkel ábrázolva. A csillaggal jelölt telephelyen egy nyomatási művelet végrehajtása történik. A BC csőben E10 benzín (SO: 1), míg az AB csőben E10 benzín (SO: 1), és E5 benzín (SO: 2) található. A termékek színe megegyezik a céltelephely színével. A termékek felett látható téglalapokban látható a termék céltelephelye és csőhálózata. A BC csőben lévő E10 benzín (NYMAZ: 1) és az AB csőben lévő E10 benzín (NYMAZ: 1) nyomatási művelet azonosítója megegyezik. Ez azt jelenti, hogy a két termék valójában egy nyomatási művelethez tartozó termék csak két csőben.



22. ábra. Termékek sorszáma és nyomatás azonosítója.

6.1.1.2 Termékek áramlási iránya a csövekben

Egy termék csőhálózata az érintett csövek sorrendje mellett meghatározza a csövek áramlási irányát. Ez az irány mondja meg, hogy melyik irányba kell áramolnia egy terméknek az adott csövön keresztül, hogy elérje a céltelephelyét. Például a 22. ábrán zöld színnel látható E5 benzín úgy juthat el a B telephelyre, ha az A telephelyről a B telephely felé áramol az AB csőben. Egy csőben csak azonos

iránnyal rendelkező termékek lehetnek, így egy cső bármely termékének az áramlási iránya egyben a cső áramlási iránya is.

6.1.2 Kézi útvonalmódosítás

A kézi útvonalmódosítás azt jelenti, hogy az ütemezők egy már csőben lévő nyomatásra felvihetnek egy útvonalmódosítási műveletet. Egy útvonalmódosítási művelet egy megadott időpontra vonatkozik. Egy adott időintervallum szimulálásakor a rendszer először az útvonalmódosítási műveleteket hajtja végre és csak utána a nyomatási műveleteket. Egy útvonalmódosítási művelet egy adott csőben lévő adott termékek módosítására szolgál. Amikor egy több csőben lévő nyomatást kell módosítani, akkor minden egyes csőre külön kell felvenni az útvonalmódosításokat. Például, ha a 22. ábrán lévő nyomatás (NYMAZ: 1) teljes egészét módosítaná az ütemező, akkor fel kell venni egy útvonalmódosítást a BC cső első termékére (SO: 1), valamint az AB cső első termékére (SO: 1) is. A csőtartalmakra vonatkozó műveletek egy sorát az UTM kifejezés határozza meg, amely a következő adattagokból áll:

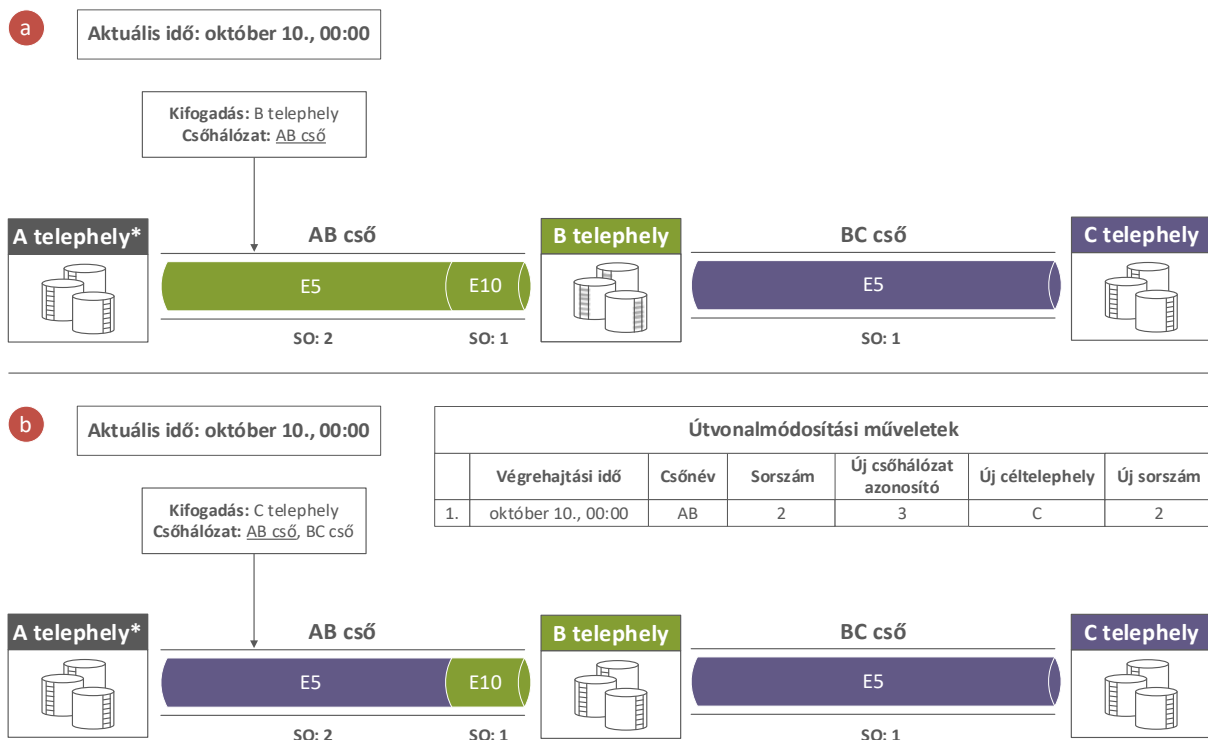
$$UTM = (Az, VegrehajtsiIdo, CsoAz, Sorszam, UjCsohalozatAz, UjSorszam) \quad (8)$$

Az első paraméter azonosítja az útvonalmódosító műveletet. A második az az időpont, amikor a módosítást végre kell hajtani. A harmadik annak a csőnek az azonosítója, amelyben az adott termék szerepel. A negyedik egy sorszám, amely meghatározza a termék csőben lévő pozícióját. Az ötödik határozza meg az új csőhálózatot és vele együtt az új céltelephelyet. Az utolsó pedig az új terméksorrendet határozza a csőben, ha változik (például kettéválasztás esetén).

6.1.2.1 Egyszerű útvonalmódosítás

Egyszerű útvonalmódosításkor egy csőben lévő termék útvonala és céltelephelye kerül módosításra úgy, hogy a cső áramlási iránya nem változik. Ez akkor van így, ha az új csőhálózat alapján is ugyanabba az irányba kell haladnia a terméknek, mint korábban. Egy ilyen módosítás nem lesz befolyással a csőben lévő többi termékre.

A 23. ábra (a) részében látható, hogy az AB csőben lévő E5 benzín csőhálózata egy csőből (AB) áll, céltelephelye pedig a B telephely. Egy váratlan esemény miatt az AB csőben lévő E5 benzint át kell irányítani a C telephelyre, ezért az ütemező egy útvonalmódosítást hoz létre éjfélre. Amikor a szimuláció eléri az éjfél, akkor a nyomatási műveletek feldolgozása előtt végrehajtódik a beállított útvonalmódosítási művelet. A 23. ábra (b) részében látható, hogy az AB csőben lévő E5 benzín céltelephelye a B telephelyről a C telephelyre a csőhálózat pedig az AB és BC csövekre változik (ez a 3-as azonosítójú csőhálózat).

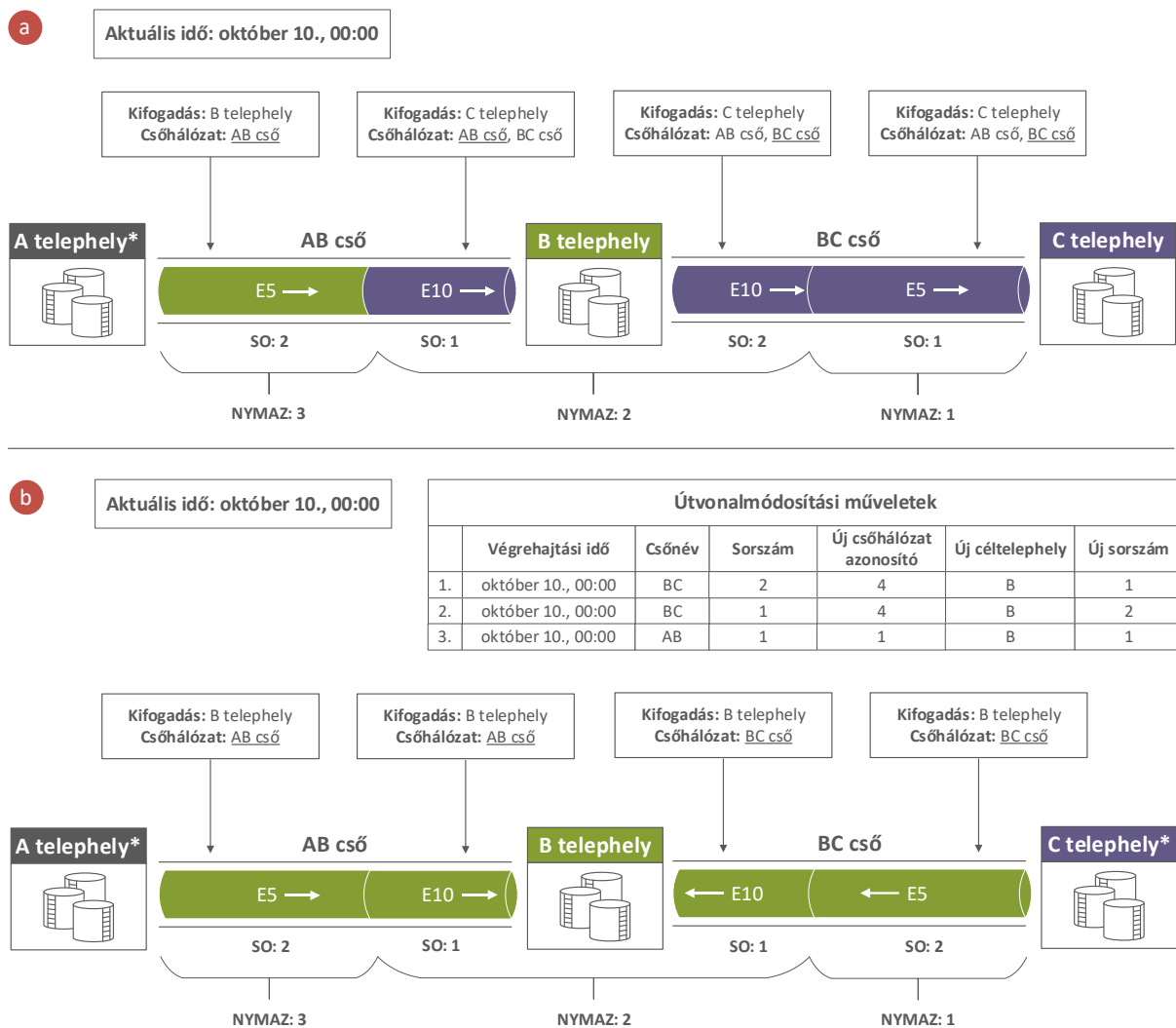


23. ábra. Az egyszerű útvonalmódosítás folyamata a szimulációban.

6.1.2.2 Áramlási irány megfordítása

Az áramlási irány megfordításakor egy csőben lévő termék útvonala és céltelephelye úgy kerül módosításra, hogy a cső áramlási iránya az eddigivel ellentétes lesz. Ekkor a csőben lévő többi termék csőhálózatát is módosítani kell, hogy a terv megvalósítható maradjon.

A 24. ábra (a) részében az AB csőben lévő E10 benzin céltelephelye a C telephely, az E5 benziné pedig a B telephely. A BC csőben lévő E5 és E10 benzinek céltelephelye a C telephely. Az AB csőben lévő E10 benzin és a BC csőben lévő E10 benzin ugyanazon nyomtatáshoz (NYMAZ: 2) tartozó termék. A B telephelynek sürgősen E10 benzinre van szüksége. Az ütemező ezt az igényt a már a csőekben lévő E10 benzinből akarja kielégíteni. Az ütemezőnek három útvonalmódosítást kell beütemeznie éjfélre a 24. ábra (b) részén látható módon. Az első módosítás alapján a BC csőben lévő E10 benzin új céltelephelye a B telephely, új sorszámának pedig az 1-es érték kerül beállításra. A termék azért kapott új sorszámot, mert az áramlási irány megfordulásával a csőben lévő termékek sorszáma is megváltozik. Hogy a terv megvalósítható maradjon a csőben lévő E5 benzinnek is új csőhálózatot kellett megadni, amely már csak a BC csövet tartalmazza. Új céltelephelynek a B telephely új sorszámának pedig a 2-es érték került beállításra. A harmadik útvonalmódosítás az AB csőben lévő E10 benzin céltelephelyét módosítja a B telephelyre. Amikor a szimuláció eléri az éjfél, akkor végrehajtnak az útvonalmódosítási műveletek, így a csőekben lévő E10 benzinek a B telephely felé kezdenek áramolni.

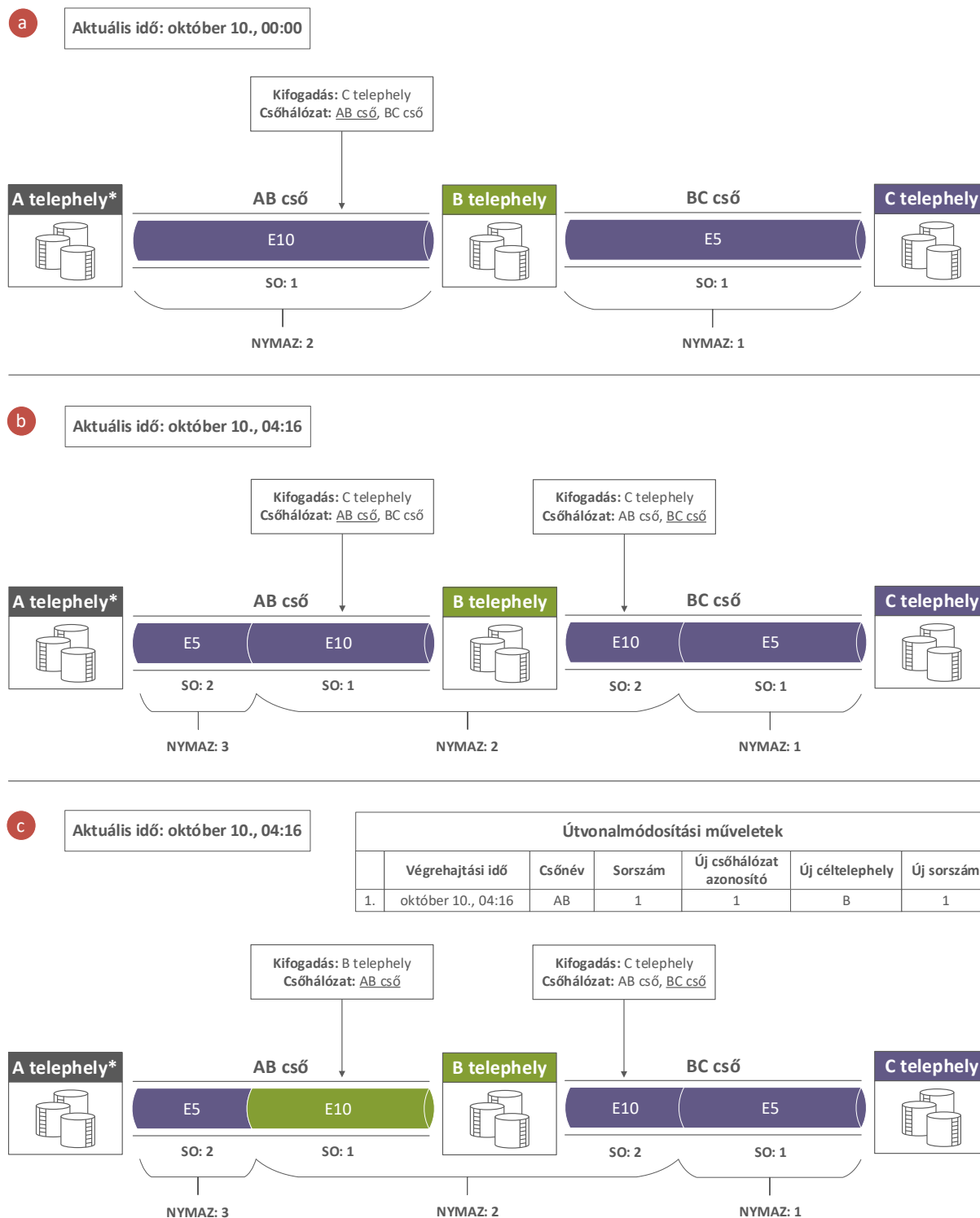


24. ábra. Az áramlási irány megfordításának folyamata a szimulációban.

6.1.2.3 Kettéválasztás

Kezdetben az a cél fogalmazódott meg, hogy egy csőhálózatba nyomott termék a csővégeknél kettéválasztható legyen. Ez nem jelent nehézséget, mivel egy adott termék esetén az új csőhálózatot csövenként lehet meghatározni. A kettéválasztandó termék első felének a csőhálózatát módosítjuk, míg a második felét szintén módosítjuk (vagy változatlanul hagyjuk) a telephelyi igények alapján.

A 25. ábra (a) részében látható, hogy az ütemezési terv készítésekor az AB csőben lévő E10 benzin kifogadási telephelye C, amelyet az AB és a BC csöveken keresztül tud elérni. Előfordulhat egy olyan forgatókönyv, hogy a B telephelynek sürgősen 500 m³ E10 benzinre van szüksége. Ebben az esetben az ütemező egy új útvonalmódosítási műveletet hoz létre. A 25. ábra (b) részén látható, hogy 4 óra 16 perckor a szimuláció az AB és BC csőben is jelenlévő nyomtatás (NYMAZ: 2) E10 benzint kettéválasztja. Az AB csőben lévő 500 m³-es résznek a kifogadási telephelye a B telephely lesz, lásd a 25. ábra (c) része.



25. ábra. Az termékek kettéválasztásának folyamata a kezdeti módszerrel.

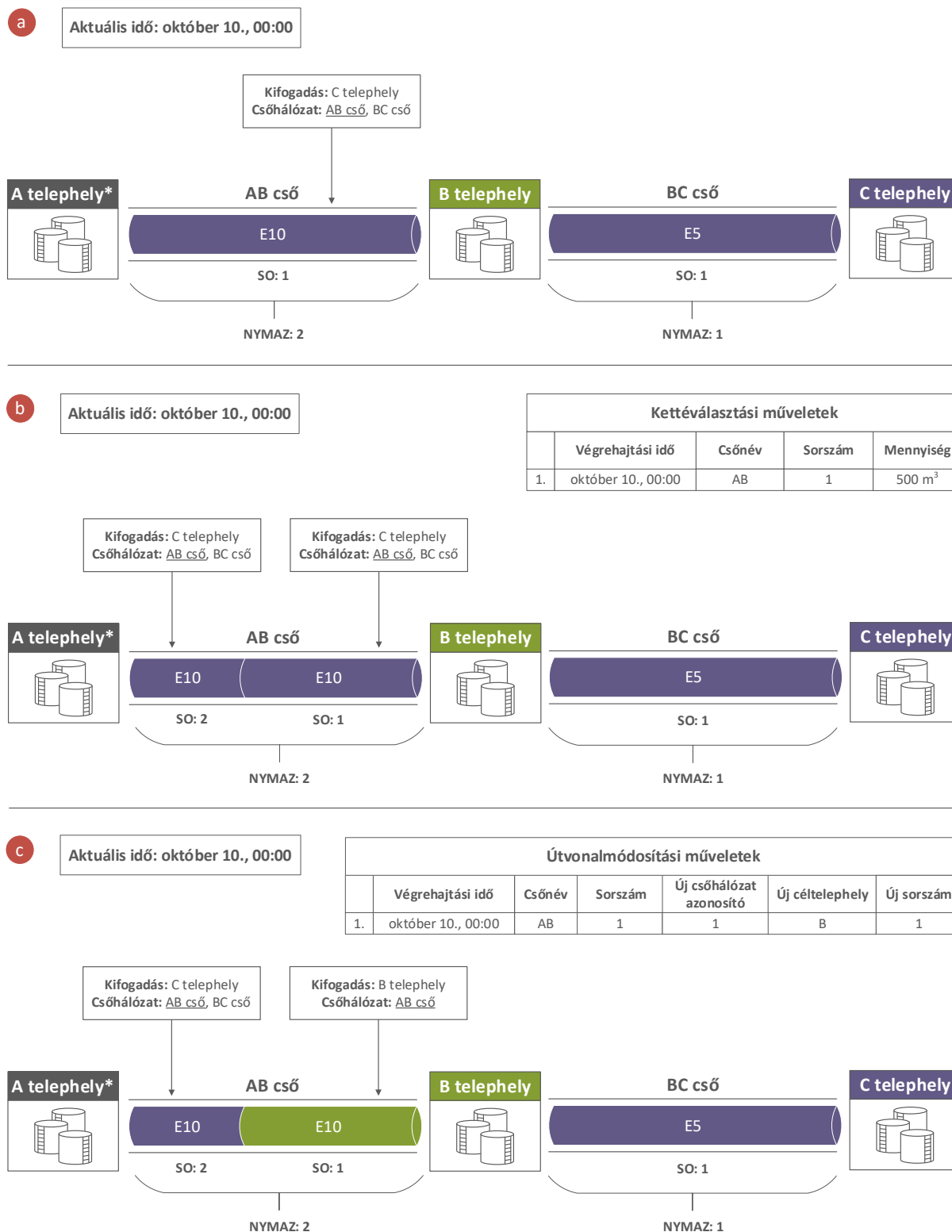
A csővégeknél történő kettéválasztás több megkötéssel jár együtt. Az ütemező nem tudja, hogy melyik percben lesz pontosan 500 m³-nyi mennyiség az E10 benzinből az AB csőben, ezért a módosítás felvitele előtt többször is le kell futtatnia a szimulációt, hogy ezt megállapítsa. A módszer csak csővégeknél tud vágni, így először ki kell várni az 500 m³ fölötti termék mennyiség kifogadását a másik csőbe és csak utána lehet végrehajtani a kettéosztást.

Később úgy módosítottuk a szimulációs modellt, hogy egy csőön belül is lehetséges legyen a kettéválasztás. Az ütemező a csőben lévő termékekre felvihet egy úgynevezett kettéválasztási műveletet. Az ilyen típusú műveleteket a szimulátor az útvonalmódosítási műveletek előtt hajtja végre. A csőtartalmakra vonatkozó műveletek egy sorát a KVM kifejezés határozza meg, amely a következő adatokból áll:

$$KVM = (Az, VegrehajtsiIdo, CsoAz, Sorszam, TermekMennyisege) \quad (9)$$

Az első paraméter azonosítja az adott kettéválasztási műveletet. A második az időpont, amikor a kettéválasztást végre kell hajtani. A harmadik az adott termék cső azonosítója. A negyedik egy sorszám, amely meghatározza a termék pozícióját a csőben. Az utolsó pedig az a mennyiség, amelyet le kell választani az eredeti termékből.

A 26. ábra (a) részében látható, hogy az ütemezési terv készítésekor az AB csőben lévő E10 benzin kifogadási telephelye C, amelyet az AB és a BC csöveken keresztül tud elérni. A feladat ugyanaz, mint az előző esetben. A B telephelynek 500 m³ E10 benzinre van szüksége. Az ütemező először egy kettéválasztási műveletet hoz létre, amely a 26. ábra (b) részében látható. Ez október 10-én éjjelkor az AB csőben lévő E10 benzint kettéválasztja egy 300 m³-es és egy 500 m³-es részre. Az ütemező létrehoz ugyanarra az időpontra egy útvonalmódosítási műveletet az 500 m³-es részre, lásd 26. ábra (c) része. A kettéválasztáskor létrejövő új terméknek (SO: 1) egy új céltelephelyet (B) állít be.



26. ábra. Az termékek kettéválasztásának folyamata a végleges módszerrel.

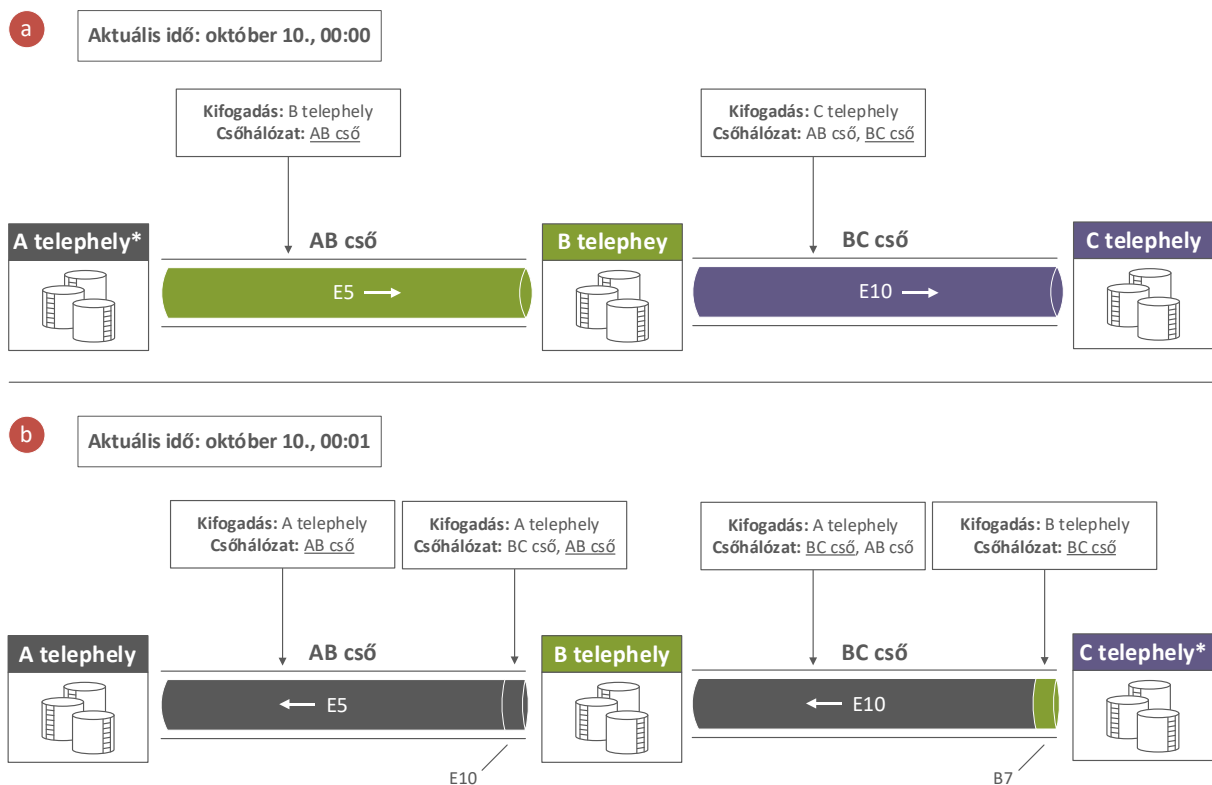
6.1.3 Automatizált útvonalmódosítás

Ha a szimulátorban engedélyezzük, akkor egyes esetekben automatikus útvonalmódosításokat is lehet alkalmazni. Például, amikor olyan termék kerül be a csőbe, amely áramlási iránya ellentétes a csőben lévő termékek áramlási irányával, akkor a csőben lévő termékek útvonalait módosítani kell. Az ilyen esetekben a szimulátor egy előre meghatározott stratégia szerint jár el.

6.1.3.1 Visszatérés a forrástelephelyre

Visszatérés a forrástelephelyre stratégia esetén, ha egy csőbe kerülő termék áramlási iránya ellentétes a csőben lévő termékek áramlási irányával, akkor a csőben lévő termékek automatikusan a kiindulási telephelyükre térnek vissza (felülírva az eredeti csőhálózatot). Ez egyszerű, ha a csőben lévő termék a cső elején lévő telephelyről indult, ellenkező esetben biztosítani kell, hogy a visszafordított termék kaszkád módon más termékeket is vissza tudjon fordítani.

A 27. ábra (a) részében az AB csőben lévő E5 benzin céltelephelye a B telephely, a BC csőben lévő E10 benzinnel céltelephelye pedig a C telephely. Mindkét termék balról jobbra áramlik a csövekben. Előfordulhat egy olyan esemény, amely miatt az ütemező úgy dönt, hogy éjfélkor a BC csőbe B7 típusú terméket nyomtat a C telephelyen, hogy ki tudja elégíteni a B telephelyen fellépő igényt. A szimuláció detektálja, hogy a BC csőben lévő E10 benzin áramlási iránya ellentétes a C telephelyen nyomtatott B7 termék áramlási irányával, lásd 27. ábra (b) része. Ekkor ütemezési hiba megjelenítése helyett az E10 benzint a forrás telephelyére (A) irányítja a szimulátor. Ekkor az AB csőbe bekerülő E10 benzin áramlási iránya is ellentétes lesz az E5 benzin áramlási irányával, így a szimulátor az E5 benzint is a forrás telephelyre (A) irányítja.

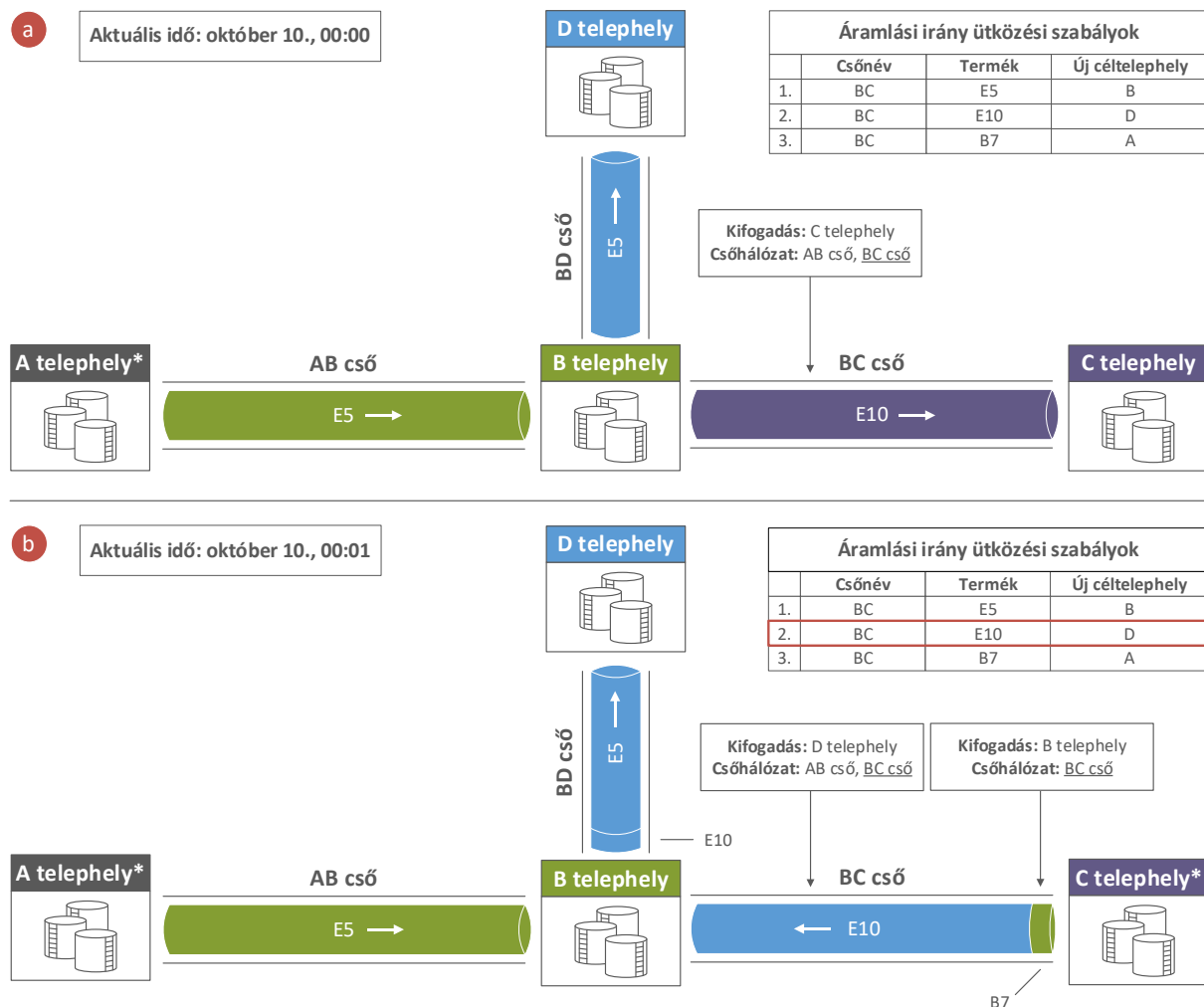


27. ábra. A csőben lévő termékek automatizált visszairányítása a forrástelephelyekre.

6.1.3.2 Visszatérés egy előre meghatározott telephelyre

A visszatérés egy előre meghatározott telephelyre stratégia esetén, ha a szimuláció ellentétes áramlási irányt detektál, akkor a csőben lévő termék új kifogadási telephelyének meghatározása egy táblázat segítségével történik. A 28. ábra (a) részében a BC csőben lévő E10 benzin kifogadási telephelye a C telephely. Egy rendkívüli esemény miatt az ütemező úgy dönt, hogy B7 típusú terméket kell szállítania a B telephelyre a C telephelyről. Amikor megkezdődik a C telephelyen a B7 termék nyomtatása, akkor a szimulátor detektálja, hogy a csőben lévő E10 benzin áramlási iránya ellentétes a

nyomatandó termékével. Ekkor a szimulátor az áramlási irány ütközési szabályok alapján a BC csőben lévő E10 benzin kifogadási telephelyét a C telephelyről a D telephelyre módosítja, lásd a 28. ábra (b) része.

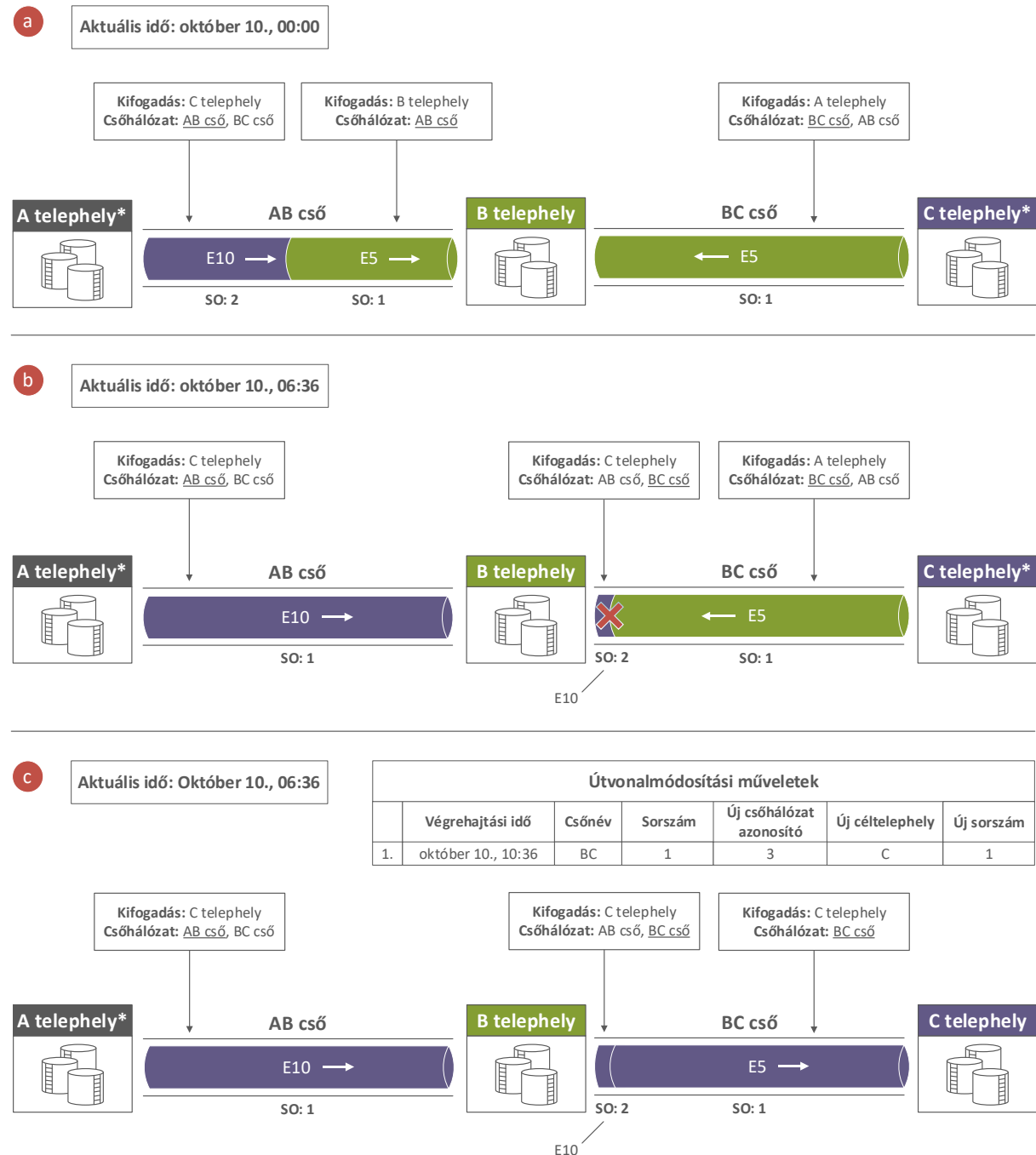


28. ábra. A csőben lévő termékek automatizált irányítása az áramlási irány ütközési szabályok alapján.

6.1.4 Az útvonalmódosítás nehézsége

A gyakorlatban vannak olyan esetek, amikor az ütemező nem tudja előre meghatározni, hogy mikorra kell felvennie egy útvonalmódosítási műveletet, hogy az ütemezési terv megvalósítható legyen. A 29. ábra (a) részén látható, hogy a szimuláció kezdetén éjfélkor az AB csőben lévő E5 benzin kifogadási telephelye a B telephely, az E10 benziné pedig a C telephely. A BC csőben lévő E5 benzin kifogadási telephelye a B telephely. Az A telephelyről az AB csőbe a C telephelyről pedig a BC csőbe folyamatosan nyomtatják a termékeket. Mivel az AB csőben található E10 benzin céltelephelye a C telephely, az ütemező tudja, hogy a BC csőben lévő E5 benzin csőhálózatát majd módosítani kell, de még nem tudja pontosan, hogy mikor. Először csőhálózat módosítás nélküli futtatja le a szimulációt, amely 6 óra 36 perckor hibát jelez a 29. ábra (b) részén látható módon. Ekkor kifogadásra került az AB csőből az összes E5 benzin és az E10 benzinnek tovább kell áramolnia a BC csőben a C telephely felé. A BC csőben lévő E5 benzin áramlási iránya ellentétes az E10 benzinével, így a szimulátor ezt jelzi. Az ütemező most már tudja, hogy mikorra kell felvennie az útvonalmódosítási műveletet. Ezt meg is teszi,

majd újraindítja a szimulációt. A 29. ábra (c) részén látható módosítás alapján 6 óra 36 perckor a BC csőben úgy módosul az E5 benzin útvonala, hogy a termék a B telephely helyett a C telephelyen kerüljön kifogadásra, ezzel együtt a termék áramlási iránya megfordul. Ekkor az AB csőben lévő E10 benzin már tovább tud áramolni a BC csőbe, mivel a csövekben lévő termékek áramlási irányai megegyeznek.



29. ábra. Példa egy nehéz szimulációs problémára.

6.2 Szelepműveletek

Bonyolult csőhálózatokban a termékek megfelelő telephelyre történő szállításához elengedhetetlen a csőelágazásoknál lévő szelepek átállítása a megfelelő időben. A szimulátor továbbfejlesztett verziója képes megadni, hogy mikor és hogyan kell állítani a szelepeket. Egy

szelepművelet meghatározásához szükség van a csőben lévő termékek csőhálózataira. A csőhálózatok tartalmazzák azokat a csöveket, amelyeken a terméknek át kell haladnia, valamint azt a céltelephelyet, ahol a termék kifogadásra kerül. A szelepműveletek egy sorát az SZM kifejezés adja meg, amely a következő adattagokból áll:

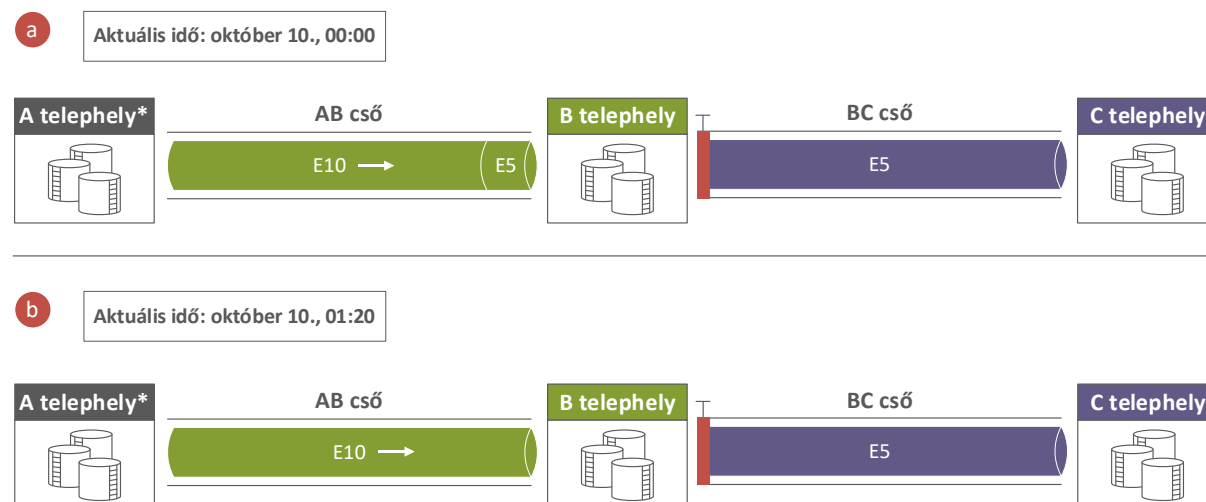
$$SZM = (Az, VegrehajtasiIdo, SzelepAZ, SzelepAllapot) \quad (10)$$

Az első paraméter azonosítja a szelepműveletet. A második az az időpont, amikor a műveletet végre kell hajtani. A harmadik azonosítja a szelepet, még a negyedik a szelep új állapotát határozza meg.

Csőelágazások esetén a csőben lévő utolsó két termék határozza meg, hogy a szimulátornak fel kell vennie egy új szelepműveletet vagy sem. Négy esetet különböztethetünk meg egymástól.

6.2.1 Az utolsó két termék mindegyike az aktuális cső végén kerül kifogadásra

A 30. ábra (a) részében az látható, hogy az AB csőben lévő E5 és E10 benzinek is a B telephely a céltelephelye. A 30. ábra (b) részében piros színnel látható, hogy az AB csőben lévő E5 termék kifogadásakor, 01:20-kor az AB és BC csövet összekötő szelep zárt állapotban marad, vagyis a szimulátor nem jelez szelep átállítást.



30. ábra. Szelepállapotok, amikor az utolsó két termék mindegyike az AB cső végén kerül kifogadásra.

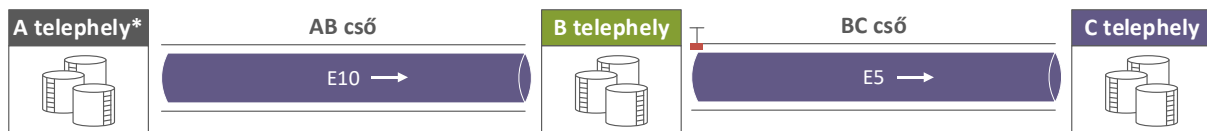
6.2.2 Az utolsó két termék egyike az aktuális cső végén kerül kifogadásra

A második esetben az AB csőben lévő E5 benzin kifogadási telephelye a B telephely, míg az E10 benzin kifogadási telephelye a C telephely, lásd 31. ábra (a) része. Éjfélkor az AB és BC csöveket összekötő szelep zárt állásban van. Mivel a két termék kifogadási telephelye eltérő, így az E5 benzin kiürülése után, 1 óra 20 perckor egy szelepműveletet vesz fel a szimulátor. A 31. ábra (b) részén látható, hogy a piros szelep már a BC csőbe irányítja az E10 terméket.

1 Aktuális idő: október 10., 00:00



2 Aktuális idő: október 10., 01:20



31. ábra. Szelepállapotok, amikor az utolsó két termék egyike az aktuális cső végén kerül kifogadásra.

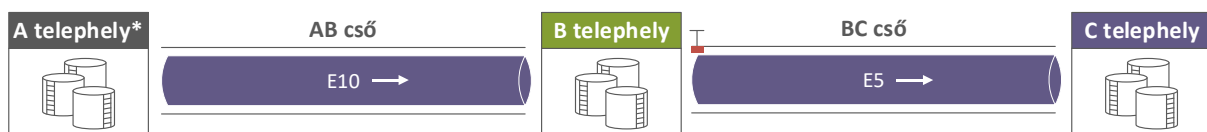
6.2.3 Az utolsó két termék útvonalában lévő következő cső megegyezik

A harmadik esetben az AB csőben lévő E5 és E10 benzinre is igaz, hogy a csőhálózatuk szerinti következő csövük a BC cső, lásd 32. ábra (a) része. A 32. ábra (b) részében látható, hogy 01:20-kor az AB és BC csövet összekötő szelep továbbra is nyitott állapotban van, vagyis nem rögzít új szelepműveletet a szimulátor.

a Aktuális idő: október 10., 00:00



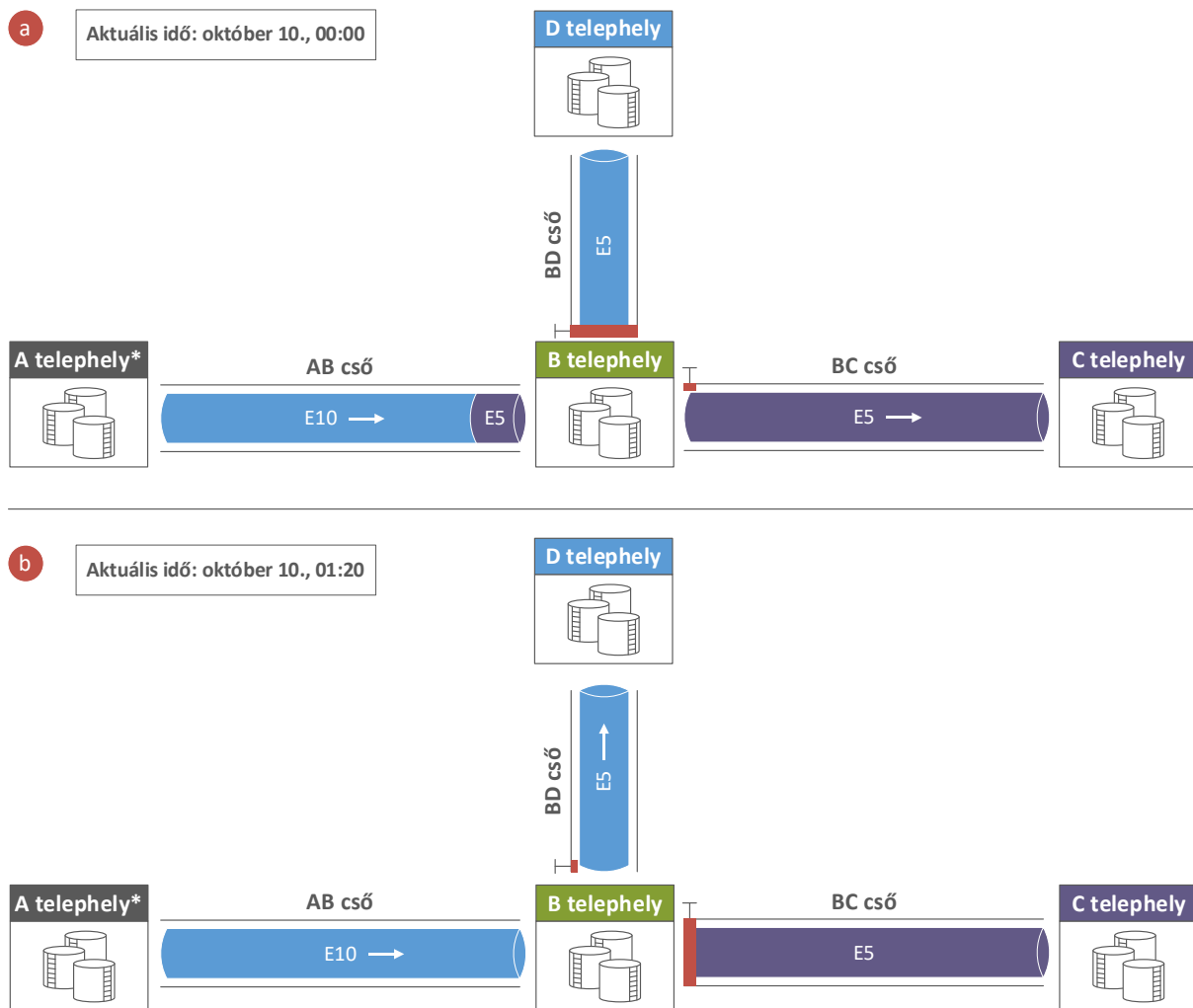
b Aktuális idő: október 10., 01:20



32. ábra. Szelepállapotok, amikor az utolsó két termék útvonalában lévő következő cső megegyezik.

6.2.4 Az utolsó két termék útvonalában lévő következő cső különböző

A negyedik esetben az AB csőben lévő E5 benzin céltelephelye a C telephely, míg az E10 benziné a D telephely, lásd a 33. ábra (a) része. Éjfélkor az AB és BC csövet összekötő szelep nyitva, míg az AB és BD csövet összekötő szelep pedig zárva van. A 33. ábra (b) részében látható, hogy 1 óra 20 perckor miután kiürül az E5 benzin az AB csőből, új szelepműveletet rögzít a szimulátor, mivel az E10 benzinnek a BD csőbe kell áramolnia, hogy elérje a D telephelyet. Ekkor az AB és BC csöveket összekötő szelep lezárásra, az AB és BD csöveket összekötő szelep pedig megnyitásra kerül. Ezt követően az AB csőben lévő E10 benzin tovább tud áramolni a BD csőbe.



33. ábra. Szelepállapotok, amikor az utolsó két termék útvonalában lévő következő cső különböző.

6.3 Tartálműveletek

A szimulációs modell kezdeti verziójában korlát volt, hogy nem lehetett kezelni a telephelyeken végbemenő tartálműveleteket. A továbbfejlesztett modellben az ütemezők már képesek felvenni keverési, szállító járműves, valamint tartályáttöltési műveleteket.

6.3.1 Finomító termékgyártás

Európában az alacsony etanol tartalmú keverékek létrehozásakor fosszilis benzint kevernek etanollal és egyéb oxigénátokkal (pl. MTBE, ETBE, metanol). Az üzemanyag neve jelzi azt, hogy az adott keverékben hány százalékos az etanol tartalom. Az E5 benzin esetén legfeljebb 5% etanolt, míg az E10 benzin esetén legfeljebb 10% etanolt tartalmaz. Beszélhetünk továbbá nyári, illetve téli üzemanyagokról is, amelyek úgy kerülnek gyártásra, hogy azok használata a legkedvezőbb legyen az adott évszakra jellemzően. Például, a téli dízel követelménye (az MSZ EN 590 alapján), hogy az üzemanyagnak -20 Celsius-fokos hőmérséklet esetén is át kell tudnia haladni a gépjármű szűrőberendezésén, míg a nyári dízel esetén ez a hőmérséklet az 5 Celsius-fok. Az üzemanyagok nyáriról télire, valamint téliről nyárra úgynevezett átállási időszakokban történik meg, amely rendszerint márciustól ápriliséig, valamint októbertől november közepéig tartó időintervallumban szokott megtörténni.

Egy termék létrehozásához az operátor egy új keverési műveletet visz fel a rendszerbe. Ekkor a kiválasztott tartály lefoglalásra kerül, és nem lehetséges belőle kifogadni vagy feltölteni, amíg be nem fejeződik a művelet. A keverési folyamat során az előre meghatározott összetevőket különböző komponens tartályokból a telephely belső csőhálózatán keresztül szállítják el a statikus keverő berendezéshez, ahol megkezdődik finomítói termékgyártás. A keverőből kijövő termék ezt követően a lefoglalt tartályba áramlik tovább, ahol egy szigorú minőség-ellenőrzésen megy keresztül. Az ellenőrzési folyamat során vizsgálják, hogy az elkészült termék tulajdonságai (pl. oktánszám, etanoltartalom) megfelelnek-e a magyar motorbenzin-szabvány követelményeinek (MSZ EN 228). Az ellenőrzési eljárás a termék típusától függően 6-24 órát is igénybe vehet. Ha a termék minősége megfelelő, akkor a következő szimulációs időintervallumban elérhetővé válik a tartály az ütemező számára. A keverési műveletek egy sorát a KE kifejezés határozza meg, amely a következő adattagokból áll:

$$KE = (Az, VegrehajtsiIdo, TartalyAz, TermekAz, Mennyisege) \quad (11)$$

Az első paraméter azonosítja a keverési műveletet. A második azt az időpontot, amikor a keverési műveletet végre kell hajtani. A harmadik határozza azt a tartályt, amelybe a késztermék kerül. A negyedik határozza meg a terméket, az ötödik pedig az előállított termék mennyiségét.

6.3.2 Szállító járműves feltöltés

Miután a finomítóból csővezetéken keresztül a megfelelő kiszolgáló telephelyre került átszállításra a termék, ezt követően valamilyen szállító járművel kell tovább szállítani azt a megrendelőhöz (MOL esetén legtöbbször egy helyi benzinkúthoz). Fontos követelmény, hogy a közúti tartálykocsikat csak a telephely nyitvatartási idején belül lehet kiszolgálni. Ez a megkötés azonban az uszályokat és a vasúti tartálykocsikat nem érinti. Előfordulhat továbbá olyan eset, hogy az adott telephelyen még nincs készleten az igényelt termék teljes mennyisége, de a csövön keresztül már folyik a termék kifogadása abba a tartályba, amelyből a feltöltési művelet kiszolgálásra kerül. A szimulációban megengedett egy tartály csőből történő feltöltése és ugyanazon tartályból egy vagy több szállító jármű feltöltése egy időben.

A szimulátor továbbfejlesztett változatában az ütemezőknél már lehetőségük nyílt szállító járműves feltöltési művelet létrehozására és kezelésére. Az ütemező ilyenkor egy új tartályműveletet visz fel a rendszerbe, és amikor a szimulációs idő a megfelelő időegységbe lép elkezdődik a meghatározott tartály letöltése és a szállító jármű feltöltése. A feltöltési műveletek egy sorát az SZJ kifejezés határozza meg, amely a következő adattagokból áll:

$$SZJ = (Az, VegrehajtsiIdo, TermekAz, Mennyisege, SzallitoJarmuAz) \quad (12)$$

Az első paraméter azonosítja a szállító járműves feltöltési műveletet. A második azt az időpontot, amikor a műveletet végre kell hajtani. A harmadik határozza meg azt a terméket, amely a szállító járműbe feltöltésre kerül, a negyedik pedig magát a termék mennyiségét. Az ötödik azt a szállító járművet azonosítja, amelybe a termék kerül.

6.3.3 Telephelyen belüli tartályáttöltés

A kiszolgáló telephelyeken lévő tartályok nem mindegyike használható bizonyos szállító járművek kiszolgálása esetén. Ilyenkor egy olyan tartályba kell átszivattyúzni az adott terméket, amelyből már kiszolgálható az adott szállító jármű. Továbbá, a terméktartályok immobil részen felhalmozódó szennyeződések esetén bizonyos időközönként szükségessé válik a tartályok kiürítése és tisztása. Ilyen

esetekben a tartály mobil részében lévő terméket egy másik tartályba szivattyúzzák át a telephely belső csőhálózatán keresztül, hogy megkezdhessék a tartály leürítését és tisztítását. Az ehhez hasonló esetek miatt szükségessé vált a telephelyeken belüli tartályáttöltési műveletek bevezetése.

A szimulátor továbbfejlesztett változatában lehetőségük nyílt az ütemezőknél tartályáttöltési művelet létrehozására a telephelyeken. Az ütemező ilyenkor egy új tartályműveletet visz fel a rendszerbe, és amikor a szimulációs idő a megfelelő időegységbe lép elkezdődik a meghatározott forrástartály letöltése és céltartály feltöltése. Az áttöltési műveletek egy sorát a TAR kifejezés határozza meg, amely a következő adattagokból áll:

$$TAR = (Az, VegrehajtsiIdo, ForrastartalyAz, CeltartalyAz, Mennyisege) \quad (13)$$

Az első paraméter azonosítja a tartályáttöltési műveletet. A második azt az időpontot, amikor a műveletet végre kell hajtani. A harmadik határozza meg azt a forrástartályt, amelyből a terméket le kell tölteni. A negyedik adja meg azt a céltartályt, ahova a terméket fel kell tölteni. Végül az ötödik határozza meg a termékmennyiséget.

7. Numerikus eredmények

7.1 A szimulátor számítási eredményei

A szimulátor C# programozási nyelven íródott. A következő számítógép-konfiguráción használtuk:

- Intel Core i5-8265U CPU (1.80GHz)
- Samsung 16 GB DDR4-2666 DDR4 SDRAM
- Samsung 870 EVO SSD (500 GB, SATA-III)
- Intel UHD Graphics 620

A szimulátor sebességét eltérő hosszúságú ütemezési tervek segítségével teszteltük le, amelyek eredményeit az 5. táblázat jeleníti meg. A legrövidebb terv 7 napos volt. Ennek ellenőrzése átlagosan 2.4 másodpercig tartott. A terv 122 eladási és 6 keverési, valamint 44 szivattyúzási műveletet tartalmazott, amely összesen 198 533 eseményt generált. A leghosszabb terv 28 napos volt, amely 8.9 másodperc alatt futott le 483 eladási, 21 keverési és 179 nyomatási művelet végrehajtásával. Az ütemezési terv ellenőrzése során 768 083 esemény került végrehajtásra. A táblázatból látható, hogy a futási idő arányosan nő a terv méretével. Ennél a példánál a végrehajtandó tevékenységek egyenletesen oszlanak el a tervezési időintervallumban.

5. táblázat. Számítási eredmények listája.

Tervek	Nyomatási műveletek (db)	Eladási műveletek (db)	Keverési műveletek (db)	Események (db)	Átlagos futási idő (mp)
7 napos terv	44	122	6	198 533	2.4
14 napos terv	89	242	11	399 033	4.6
21 napos terv	134	362	16	583 733	6.8
28 napos terv	179	483	21	768 083	8.9

7.2 A szimulátor eredményeinek bemutatása egy valós példán keresztül

Magyarország legnagyobb olajcégének, a MOL-nak havonta százas nagyságrendű megrendelést kell kiszolgáltatnia vezetékek segítségével. A termékek gyártása két telephelyen, Százhalombattán és Tiszaújvárosban történik. A vállalathoz beérkező igényeket az ügyfelek által kért telephelyre kell szállítani. A példában egy fiktív, de a valósághoz közeli forgatókönyv kerül bemutatásra, mivel a pontos készletmennyiségek értéke bizalmas információ. A havi tervben a vállalat magyarországi régióihoz tartozó igényeket szolgáljuk ki. A terv egyes szakaszai periodikus nyomatási műveletek is tartalmaznak. Például a Budapest Nemzetközi Repülőtér termékigénye minden héten azonos a szimulált időszakban.

A szimulált rendszer összesen 20 csőhálózatot, 19 csővezetékot, valamint 44 tartályt tartalmaz. A beérkezett 534 eladási műveletet az adott tartály- és csőkészlet alapján 199 nyomatási és 24 keverési művelettel lehetett kielégíteni. Az egy hónapra vonatkozó nyomatási, keverési és eladási műveletek, valamint a cső- és tartály készletek letölthetők táblázatos formában [50]. A szimulátor a szimulációs idő bármely pontján képes megjeleníteni az aktuális készleteket. A vizsgált hónap elejéről, közepéről és végéről is tettünk közzé cső- és tartály készlet adatokat.

A feladatban a beérkezett igények alapján kellett létrehozni a szükséges keverési és nyomatási műveleteket. A beérkezett igényeket eladási műveletekként kezeljük. A 6. táblázatban a példában szereplő eladási műveletek egy részlete látható. Az első oszlopban az eladási művelet azonosítója látható. A második oszlopban az eladási időpont szerepel, ekkor kell levonni a tartály készletből az eladott termék mennyiségét. A harmadik és negyedik oszlop tartalmazza a tartály és a telephely nevét. Az ötödik és hatodik oszlop határozza meg a termék típusát, valamint az eladott termékmennyiséget. Például az 1-es eladási művelet esetén 2023. október 1-én 23 óra 59 perckor kell levonni a Százhalombatta telephelyen lévő SZÁ-E10-02 tartály készletéből az eladott termékmennyiséget (200 m³ E10 benzint).

6. táblázat. Eladási műveletek listája.

AZ	Eladási idő	Tartály	Telephely	Termék	Mennyiség (m ³)
1	2023-10-01 23:59	SZÁ-E10-02	Százhalombatta	E10	200
2	2023-10-02 23:59	SZÁ-E10-02	Százhalombatta	E10	120
3	2023-10-03 23:59	SZÁ-E05-01	Százhalombatta	E05	400
4	2023-10-05 23:59	SZÁ-E05-01	Százhalombatta	E05	400
5	2023-10-06 23:59	SZÁ-E10-02	Százhalombatta	E10	80
...					
532	2023-10-30 23:59	KEC-B07-01	Kecskemét	B07	80
533	2023-10-31 23:59	KEC-B10-01	Kecskemét	B10	240

Mivel számos nagy mennyiségű igényt kell kielégíteni, elengedhetetlen volt a termékek keverése. A termékgyártások a szimulátorban keverési műveletekként kerültek kezelésre. A 7. táblázatban a példában szereplő keverési műveletek egy részlete látható. Az első oszlopban a keverési művelet azonosítója látható. A második oszlop a keverési művelet kezdetét határozza meg. A harmadik és negyedik oszlop tartalmazza a tartály és a telephely nevét. Az ötödik és hatodik oszlop határozza meg a termék típusát és a keverendő termékmennyiséget. Például az 1-es azonosítóval rendelkező keverési műveletet 2023. október 1-én éjfélkor kell megkezdeni Százhalombattán az SZÁ-E10-01 tartályban, a cél 14 000 m³ E10 benzint keverése.

7. táblázat. Keverési műveletek listája.

AZ	Végrehajtási idő	Tartály	Telephely	Termék	Mennyiség (m ³)
1	2023-10-01 00:00	SZÁ-E10-01	Százhalombatta	E10	14 000
2	2023-10-02 15:00	SZÁ-B07-02	Százhalombatta	B07	14 000
3	2023-10-04 00:00	SZÁ-B10-02	Százhalombatta	B10	10 000
4	2023-10-05 00:00	SZÁ-JET-02	Százhalombatta	JET	6 000
5	2023-10-06 00:00	SZÁ-E10-02	Százhalombatta	E10	10 000
...					
23	2023-10-30 00:00	SZÁ-B07-01	Százhalombatta	B07	10 000
24	2023-10-31 00:00	SZÁ-E05-02	Százhalombatta	E05	11 000

A szimuláció során számos nyomatási műveletet kellett létrehozni, hogy a szükséges termékmennyiségeket az eladási telephelyre szállítsuk. A 8. táblázatban a feladat során létrehozott nyomatási műveletek egy részlete látható. Az első oszlopban a nyomatási művelet azonosítója van. A számozás azért kezdődik 20-tól, mert 19 nyomatási művelet már végrehajtásra került, a kapcsolódó

termékek pedig már a csövekben vannak. A második oszlopban a végrehajtási idő látható, amikor el kell kezdeni az adott telephelyen a termék nyomtatását a csőbe. A harmadik oszlop tartalmazza a csőhálózatot, amely meghatározza a termék számára, hogy melyik csöveken kell keresztül haladnia. A negyedik oszlop a forrástartályt adja meg. Az ötödik oszlop a céltartályt tartalmazza. A hatodik oszlop a terméket, a hetedik pedig a termékmennyiségét határozza meg köbméterben. Például a 20-as nyomatási művelet 2023. október 1-én éjfélkor kezdődik, 1 200 m³ E10 benzint kell nyomtatni a százhalmattai a SZÁ-E10-02 tartályából a DUFI-Komárom 12" csőhálózaton. Ez a csőhálózat a Százhalmatta-Kápolnásnyék 10" és a Kápolnásnyék-Komárom 12" csöveket tartalmazza (alapértelmezett áramlási iránnyal). A 4.1.3-as fejezetben már említésre került, hogy a csöveknek két irányuk van, de ezek közül mindig csak az egyik aktív. Ezt az irányt nevezzük alapértelmezett áramlási iránynak, amelyet az adott csőhálózat egyértelműen meghatároz.

8. táblázat. Nyomatási műveletek listája.

AZ	Végrehajtási idő	Csőhálózat	Forrástartály	Céltartály	Termék	Menny. (m ³)
20	2023-10-01 00:00	DUFI-Komárom	SZÁ-E10-02	KOM-E10-01	E10	1 200
21	2023-10-01 01:00	DUFI-Pécs	SZÁ-B10-01	PÉC-B10-01	B10	2 000
22	2023-10-01 01:00	DUFI-Csepel	SZÁ-B10-02	CSE-B10-01	B10	800
23	2023-10-01 03:00	DUFI-Ferihegy	SZÁ-JET-01	FER-JET-01	JET	1 100
24	2023-10-01 04:00	DUFI-Szajol	SZÁ-B10-01	SZA-B10-01	B10	1 000
...						
218	2023-10-31 05:00	DUFI-Ferihegy	SZÁ-JET-02	FER-JET-01	JET	600
219	2023-10-31 06:00	DUFI-Csepel	SZÁ-E05-01	CSE-E05-01	E05	1 000

A nyomatási műveletek létrehozásához elengedhetetlen, hogy ismerjük az aktuális cső- és tartálykészleteket. A 9. táblázatban a szimuláció elején lévő csőtartalmak egy részlete látható. Az első oszlopban a csőtartalom azonosítója van. A második oszlop cső nevét, a harmadik oszlop pedig a termék csövön belüli pozícióját jelöli (sorszám). Amikor egy termék bekerül egy csőbe akkor egy sorszámot kap, amelynek segítségével nyomon követhető, hogy hány termék van az adott csőben. Ha egy termék teljesen kitölti a csövet, akkor a termék sorszáma az 1-es lesz. Ha a csőben több termék is szerepel, akkor ezek növekvő sorszámmal kerülnek jelölésre. A negyedik oszlopban a nyomatási művelet egyedi azonosítója látható, amely segítségével a csőben lévő termékek fizikai elhelyezkedése is meghatározható. Ha egy termék két (vagy több) csőben is megtalálható, akkor a nyomatási műveletazonosítóik megegyeznek. A nyomatási művelet azonosító határozza meg a nyomatás kezdetét és végét. Például az 1-es azonosítójú csőtartalom a Százhalmatta-Cegléd 6" cső egészét kitöltő B10 dízel típusú termék, amelyet az 1-es nyomatási művelet segítségével töltöttek fel az SZÁ-B10-01 forrástartályból. A csőben lévő termék a DUFI-Kecskemét 6" csőhálózatot követve jut el a KEC-B10-01 céltartályhoz a Százhalmatta-Cegléd 6" és a Cegléd-Kecskemét csöveken keresztül.

9. táblázat. A kezdeti csőkészlet listája.

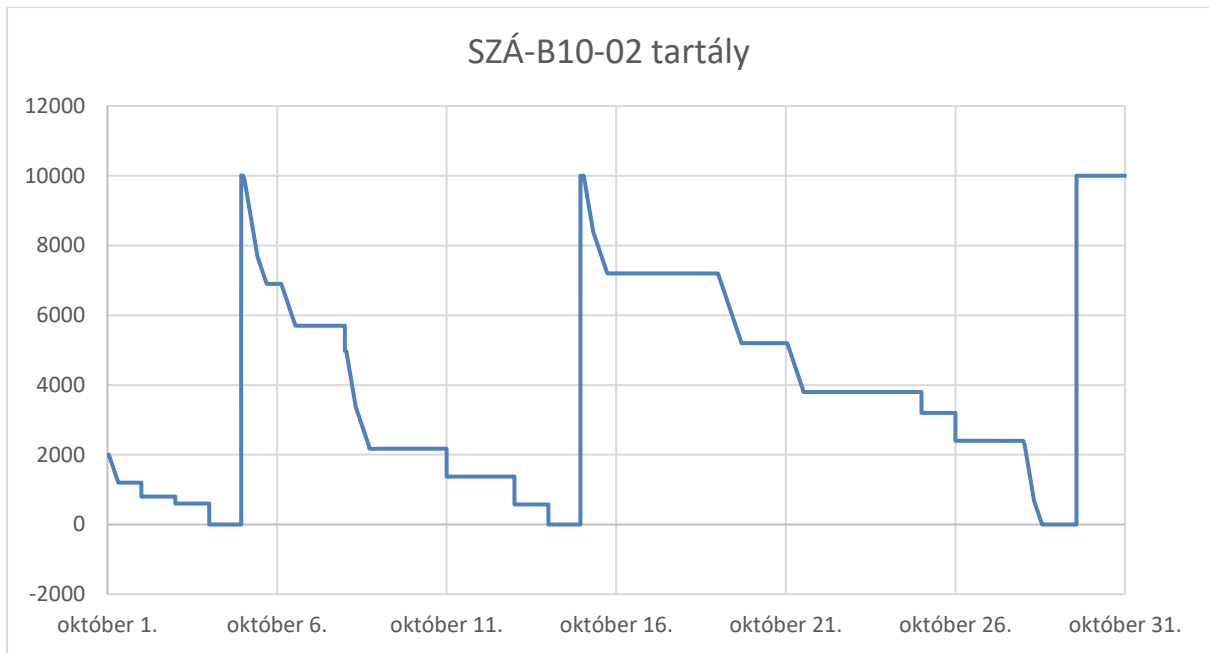
AZ	Cső	Sorszám	Nyomatási művelet az.	Termék	Mennyiség (m ³)
1	Százhalombatta-Cegléd 6"	1	1	B10	1 342,31
2	Cegléd-Szajol 6"	1	2	B10	776,39
3	Százhalombatta-Cegléd 12"	1	3	E05	5 536,30
4	Cegléd-Szajol 12"	1	4	B07	3 233,39
5	Cegléd-Kecskemét	1	5	B10	1 054,28
...					
18	Székesfehérvár-leágazó-Dombóvár	1	18	B07	7 001,11
19	Dombóvár-Pécs	1	19	B10	1 757,45

A 10. táblázatban a szimuláció elején lévő tartály készletek egy részlete látható. Az első oszlopban a tartály egyedi azonosítója van. A második oszlop azt a telephelyet tartalmazza, ahol a tartály megtalálható. A harmadik és negyedik oszlop a tartály nevét, valamint kapacitását adja meg. Az ötödik és hatodik oszlop a tartályban lévő terméket, valamint annak mennyiségét jeleníti meg. Például az 1-es azonosítójú SZÁ-E10-01 tartály Százhalombattán található. A tartály maximális kapacitása 14 000 m³. A tartály jelenleg üres, E10 benzint tárolható benne.

10. táblázat. A kezdeti tartálykészlet listája.

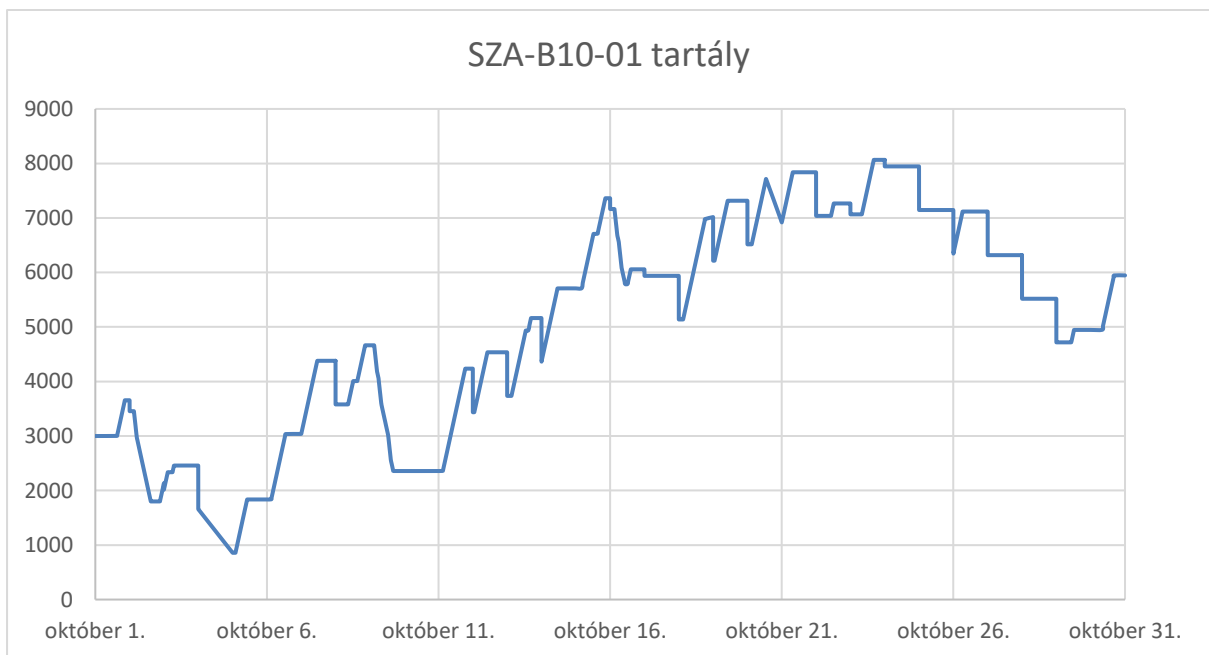
AZ	Telephely	Tartály	Kapacitás (m ³)	Termék	Mennyiség (m ³)
1	Százhalombatta	SZÁ-E10-01	14 000	E10	0
2	Százhalombatta	SZÁ-E10-02	10 000	E10	5 000
3	Százhalombatta	SZÁ-E05-01	11 000	E05	5 000
4	Százhalombatta	SZÁ-E05-02	11 000	E05	4 000
5	Százhalombatta	SZÁ-B10-01	12 000	B10	7 000
...					
43	Pécs	PÉC-E10-01	13 000	B10	5 000
44	Pécs	PÉC-E10-02	12 000	B07	1 000

A szimuláció során bekövetkezett tartályszint-változások a 34. és 35. ábrán láthatók. Attól függően, hogy a tartály finomító vagy elosztó telephelyen található, eltérő tartályszint-viselkedések figyelhetők meg. A 34. ábrán egy finomítói telephelyen található SZÁ-B10-02 tartály szintváltozásai láthatók. A tartályt október 3-án ürítik le, ezt követően indul a keverési művelet, amely végeztével hirtelen történő szintemelkedés figyelhető meg. A vízszintes szakaszok azt az állapotot jelzik, amikor nincs semmilyen tartályművelet. A lefelé irányuló lejtő nyomatási műveletet, a kisebb függőleges szakaszok pedig az eladási művelet miatt bekövetkező tartályszint csökkenést jelentik.



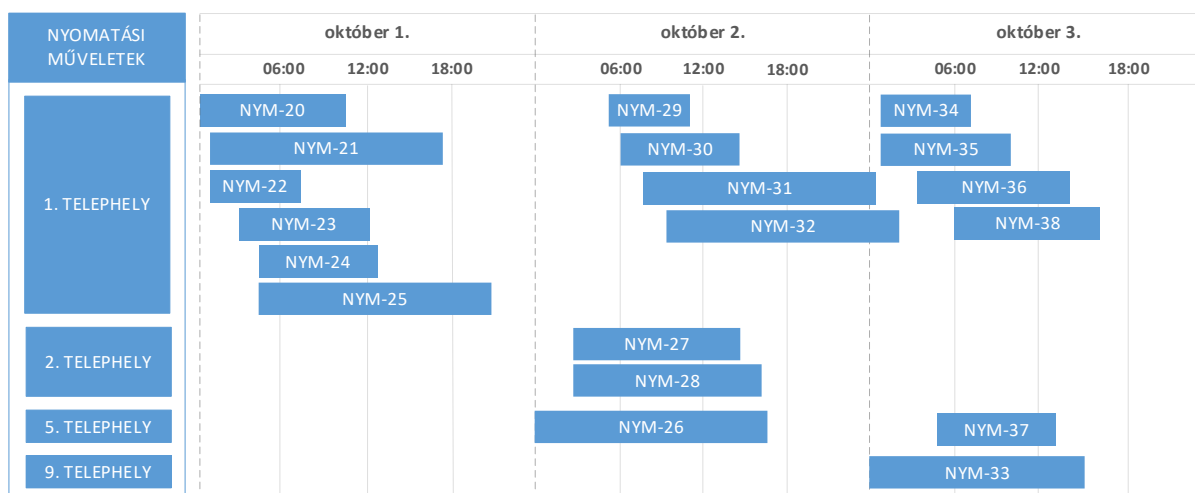
34. ábra. Egy finomító telephelyen lévő SZÁ-B10-02 tartály szintváltozása.

A 35. ábra az SZA-B10-01 tartály szintváltozását mutatja, amely egy elosztó telephelyen található. Lényeges különbség egy finomító telephelyén lévő tartályhoz képest, hogy az elosztó telephelyen nincs lehetőség termékek keverésére. Itt a tartályokat csöveken keresztül töltik fel, és az október 6-tól 16-ig tartó emelkedő trendet látjuk.



35. ábra. Egy elosztó telephelyen lévő SZA-B10-01 tartály szintváltozása.

A fejezet elején ismertetett telephelyi igények kielégítéséhez az aktuális cső- és tartálykészlet alapján 24 db keverési és 199 db nyomtatási műveletre volt szükség. A nyomtatási és keverési műveletek első három napi ütemezése a 36. és 37. ábrán látható. Az elkészült ütemezési terv futási ideje kevesebb, mint 10 másodperc volt, amelyben 839 450 esemény került végrehajtásra.



36. ábra. Gantt-diagram az első három napon végrehajtott nyomatási műveletekről.



37. ábra. Gantt-diagram az első három napon végrehajtott keverési műveletekről.

A szigorú módban a perces ütemezés nagy pontosságot vár el, amely számos nehézséget eredményezett az ütemterv elkészítésében:

- Nehéz volt meghatározni, hogy mikor kell pontosan elindítani egy nyomatási műveletet úgy, hogy a termék időben odaérjen a céltelephelyre.
- A nyomatási műveleteket úgy kellett megtervezni, hogy figyelembe kellett venni, hogy egy keverési művelet alatt az adott tartály nem elérhető. Például, többször előfordult, hogy egy olyan tartályt került beállításra, amelyben még nem fejeződött be egy keverési művelet.
- Többször előfordult, hogy olyan nyomatási műveleteket vettünk fel, amelyek ugyanazt a csövet használták volna azonos időben.
- Többször előfordult, hogy túltöltődött vagy kiürült volna egy tartály a szimuláció közben.

Az ilyen típusú problémák esetén nagy segítséget jelent az időeltolások szimuláció, amely képes elcsúsztatni egy műveletet addig, amíg fel nem szabadul a szükséges erőforrás. Az időeltolások szimuláció hasonló CPU-idő igényel rendelkezik, mint a szigorú szimuláció. Az időeltolások módszer segítségével jelentősen egyszerűsíthető az ütemezési tervek ellenőrzése, hiszen sokkal kevesebb kézi időkorrekció szükséges, mint a szigorú szimulációs mód esetén. Fontos megemlíteni, hogy az időeltolások mód nem mindig eredményez ideális tervet. Például, ha egy nyomatási műveletet sokszor csúsztatunk el, akkor nem biztos, hogy időben meg fog érkezni a kívánt termék a céltelephelyre. Előfordulhat olyan eset is, amikor két nyomatási művelet feldarabolja egymást (lásd 5.2.4 fejezet). A szerzők az időeltolások szimuláció használatát csak kisebb korrekciós hibák javítására javasolják.

8. Összefoglalás

A termékvezetékek ütemezése kritikus feladat az olajipari cégek mindennapi működésében. Hatékony szimulációs eszközre van szükség, hogy ezt a tevékenységet megbízhatóan és költséghatékonyan lehessen végrehajtani. Egy olajipari vállalat különféle termékeket állít elő a finomítóknak, és ezeket sokszor csővezetékekben szállítja el. A csővezetékek lehetővé teszik nagy mennyiségű finomított olajtermékek telephelyek közötti szállítását. A termékek meghatározott mennyiségeit egymás után nyomtatják bele a megfelelő csővezetékbe anélkül, hogy közöttük bármilyen elválasztó eszköz lenne. Az ütemezők a beérkezett igények alapján készítik el az ütemezési tervet, amely a rendszer fő műveleteit tartalmazza időrendben. Ezek közül az egyik legfontosabbak a nyomtatási műveletek, amelyek meghatározzák a szállítandó termék típusát, mennyiségét, a szállítás kezdeti idejét, befejezési idejét, valamint az útvonalat. Az ütemezési terv akkor megvalósítható, ha a végrehajtása semmilyen akadályba sem ütközik, például a cél telephelyen van elégséges tartálykapacitás, a forrás telephelyen a termék rendelkezésre áll, betartják a határidőket stb. Csak rövid idő intervallumra (3-4 nap) és csak mérsékelten bonyolult csőhálózat esetén ellenőrizhető az ütemterv manuálisan. A komplex, hónapos ütemezési tervek ellenőrzésének egyik módszere egy diszkrét eseményű szimulációs rendszer használata.

Kutatásaim során a csővezetékes termékszállítás ütemezésének ellenőrzéséhez megterveztem és megvalósítottam egy eseményvezérelt szimulációs modellt. Meghatároztam a diszkrét eseményű szimuláció alapjait, valamint definiáltam a rendszert működtető eseményeket és azok viselkedését. A módszer működésének tesztelésére egy szimulációs szoftvert fejlesztettem. A szimulációs modell működését egy valós ütemezési terv segítségével mutattam be. Ezt követően kidolgoztam a nyomtatási műveletek időeltolódásos ütemezéséhez egy módszert. Továbbfejlesztettem a korábban megvalósított diszkrét eseményű szimulációs szoftvert úgy, hogy az képes legyen az időeltolódásos szimulációs módszer tesztelésére. Meghatároztam három működési esetet az időeltolódásos szimulációs módszer bemutatására. Rámutattam a nyomtatási műveletek szakaszos végrehajtásánál felmerülő nehézségekre. Ezt követően a csőben lévő termékek útvonalának, valamint áramlási irányának módosításához dolgoztam ki módszert. Létrehoztam egy eljárást, amelynek segítségével kettéválasztható egy csőben levő termék. Ez lehetővé teszi, hogy az egyes részek eltérő céltelephelyen kerüljenek kifogadásra. Végezetül, kidolgoztam két visszatérési stratégiát a csövekben lévő termékek automatizált útvonal módosításához.

A diszkrét eseményű szimulációs modell a későbbiekben tovább bővíthető újabb jellemzők modellezésével. Ezek közé tartozik az aggregált tartályok kezelése, az olajtermékek biotartalmának kezelése, a csövekben történő termék keverés, szállítási sebesség pontosabb modellezése (drag reducing agent használatkor), államilag fenntartott stratégiai készlet folyamatos biztosítása. Egyik jövőbeli tervem az automatikus ütemezés létrehozására gépi tanulás vagy heurisztika alapokon.

9. Új tudományos eredmények

9.1 Tézisek

1. Kidolgoztam egy eseményvezérelt szimulációs módszert a termékszállítás ütemezések ellenőrzéséhez többtermékes hálószerű csőhálózatokban. [1], [51], [52], [53], [54],
 - 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. [55], [56]
 - 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 esemény vezérelt szimulációs módszert a csővezetékben lévő termékek útvonalmódosításához és a szelepműveletek meghatározásához. [55], [56]
 - 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 csővekben lévő termékek automatizált útvonalmódosításához.
 - d. Megvalósítottam egy módszert, amely a szelepműveleteket határozza meg.

9.2 Az értekezés témaköréből készült publikációk

Az értekezés témaköreiből az alábbi publikációk születtek:

Nemzetközi folyóiratcikkek

- Csontos Balázs és Heckl István: Event-driven simulation of liquid transportation through pipeline networks for oil companies, kiadvány: Chemical Engineering Transactions, kiadás: 70, oldal: 1741 (2018) [51]
- Csontos Balázs és Heckl István: Event-driven simulation method for fuel transport in a mesh-like pipeline network, kiadvány: Computer & Chemical Engineering, kiadás: 157, oldal: 107611 (2021) (IF=4.3) [1]

- Csontos Balázs és Heckl István: Improved event-driven simulation method for fuel transport in a mesh-like pipeline network, kiadvány: Computer & Chemical Engineering, kiadás: 168, oldal: 108066 (2022) (IF=4.3) [55]

Nemzetközi konferencia-kiadványokban megjelent közlemények

- Csontos Balázs és Heckl István: Simulation models for transporting oil materials in pipelines, kiadvány: Proceedings of the Pannonian Conference on Advances in Information Technology (PCIT'2019), kiadás: 1, oldal: 139 (2019) [53]

Nemzetközi konferencia előadások

- Csontos Balázs és Heckl István: 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) [52]
- Csontos Balázs és Heckl István: Simulation models for transporting oil materials in pipelines, Pannonian Conference on Advances in Information Technology (PCIT'2019), Veszprém, Magyarország (2019) [54]
- Csontos Balázs és Heckl István: Custom simulator for validating pipeline schedule in the oil industry, EDSI 2022 - EDSI 12th Annual Meeting, Dublin, Írország (2022) [56]

Irodalomjegyzék

- [1] B. Csontos, L. Halász, and I. Heckl, "Event-driven simulation method for fuel transport in a mesh-like pipeline network," *Comput Chem Eng*, vol. 157, p. 107611, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.compchemeng.2021.107611.
- [2] M. Sasikumar, P. Ravi Prakash, S. M. Patil, and S. Ramani, "PIPES: A heuristic search model for pipeline schedule generation," *Knowl Based Syst*, vol. 10, no. 3, pp. 169–175, Oct. 1997, doi: 10.1016/S0950-7051(97)00026-9.
- [3] L. Magatão, L. V. R. Arruda, and F. Neves, "A mixed integer programming approach for scheduling commodities in a pipeline," *Comput Chem Eng*, vol. 28, no. 1–2, pp. 171–185, Jan. 2004, doi: 10.1016/S0098-1354(03)00165-0.
- [4] R. Rejowski and J. M. Pinto, "Scheduling of a multiproduct pipeline system," *Comput Chem Eng*, vol. 27, no. 8–9, pp. 1229–1246, Sep. 2003, doi: 10.1016/S0098-1354(03)00049-8.
- [5] R. Rejowski and J. M. Pinto, "Efficient MILP formulations and valid cuts for multiproduct pipeline scheduling," *Comput Chem Eng*, vol. 28, no. 8, pp. 1511–1528, Jul. 2004, doi: 10.1016/j.compchemeng.2003.12.001.
- [6] D. Zyngier and J. D. Kelly, "Multi-Product Inventory Logistics Modeling in the Process Industries," in *Optimization and Logistics Challenges in the Enterprise*, Springer, 2009, pp. 61–95. doi: 10.1007/978-0-387-88617-6_2.
- [7] C. A. Hane and H. D. Ratliff, "Sequencing inputs to multi-commodity pipelines," *Ann Oper Res*, vol. 57, no. 1, pp. 73–101, Dec. 1995, doi: 10.1007/BF02099692.
- [8] F. Neves-Jr *et al.*, "An efficient approach to the operational scheduling of a real-world pipeline network," in *Computer Aided Chemical Engineering*, 2007, pp. 697–702. doi: 10.1016/S1570-7946(07)80139-8.
- [9] S. N. Boschetto *et al.*, "An Operational Scheduling Model to Product Distribution through a Pipeline Network," *Ind Eng Chem Res*, vol. 49, no. 12, pp. 5661–5682, Jun. 2010, doi: 10.1021/ie900685v.
- [10] F. Maruyama Mori *et al.*, "Simulating the operational scheduling of a realworld pipeline network," in *Computer Aided Chemical Engineering*, 2007, pp. 691–696. doi: 10.1016/S1570-7946(07)80138-6.
- [11] Á. García-Sánchez, L. M. Arreche, and M. Ortega-Mier, "Combining Simulation and Tabu Search for Oil-derivatives Pipeline Scheduling," in *Studies in Computational Intelligence*, 2008, pp. 301–325. doi: 10.1007/978-3-540-78985-7_12.
- [12] V. G. Cafaro, D. C. Cafaro, C. A. Mendez, and J. Cerda, "Oil-derivatives pipeline logistics using discrete-event simulation," in *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*, IEEE, Dec. 2010, pp. 2101–2113. doi: 10.1109/WSC.2010.5678864.
- [13] T. M. T. Lopes, A. A. Ciré, C. C. de Souza, and A. V. Moura, "A hybrid model for a multiproduct pipeline planning and scheduling problem," *Constraints*, vol. 15, no. 2, pp. 151–189, Apr. 2010, doi: 10.1007/s10601-009-9086-z.

- [14] R. Rejowski and J. M. Pinto, "A novel continuous time representation for the scheduling of pipeline systems with pumping yield rate constraints," *Comput Chem Eng*, vol. 32, no. 4–5, pp. 1042–1066, Apr. 2008, doi: 10.1016/j.compchemeng.2007.06.021.
- [15] D. C. Cafaro and J. Cerdá, "Optimal scheduling of multiproduct pipeline systems using a non-discrete MILP formulation," *Comput Chem Eng*, vol. 28, no. 10, pp. 2053–2068, Sep. 2004, doi: 10.1016/j.compchemeng.2004.03.010.
- [16] D. C. Cafaro and J. Cerdá, "Efficient Tool for the Scheduling of Multiproduct Pipelines and Terminal Operations," *Ind Eng Chem Res*, vol. 47, no. 24, pp. 9941–9956, Dec. 2008, doi: 10.1021/ie071630d.
- [17] D. C. Cafaro and J. Cerdá, "Optimal Scheduling of Refined Products Pipelines with Multiple Sources," *Ind Eng Chem Res*, vol. 48, no. 14, pp. 6675–6689, Jul. 2009, doi: 10.1021/ie900015b.
- [18] D. C. Cafaro and J. Cerdá, "Operational scheduling of refined products pipeline networks with simultaneous batch injections," *Comput Chem Eng*, vol. 34, no. 10, pp. 1687–1704, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.compchemeng.2010.03.005.
- [19] H. Mostafaei, Y. Alipouri, and J. Shokri, "A mixed-integer linear programming for scheduling a multi-product pipeline with dual-purpose terminals," *Computational and Applied Mathematics*, vol. 34, no. 3, pp. 979–1007, Oct. 2015, doi: 10.1007/s40314-014-0162-7.
- [20] H. Mostafaei, P. M. Castro, and A. Ghaffari-Hadigheh, "Short-term scheduling of multiple source pipelines with simultaneous injections and deliveries," *Comput Oper Res*, vol. 73, pp. 27–42, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.cor.2016.03.006.
- [21] H. Mostafaei and P. M. Castro, "Continuous-time scheduling formulation for straight pipelines," *AIChE Journal*, vol. 63, no. 6, pp. 1923–1936, Jun. 2017, doi: 10.1002/aic.15563.
- [22] P. M. Castro and H. Mostafaei, "Product-centric continuous-time formulation for pipeline scheduling," *Comput Chem Eng*, vol. 104, pp. 283–295, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.compchemeng.2017.04.023.
- [23] H. Mostafaei, P. M. Castro, S. Relvas, and I. Harjunoski, "A holistic MILP model for scheduling and inventory management of a multiproduct oil distribution system," *Omega (Westport)*, vol. 98, p. 102110, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.omega.2019.102110.
- [24] P. M. Castro, "Optimal Scheduling of Pipeline Systems with a Resource–Task Network Continuous-Time Formulation," *Ind Eng Chem Res*, vol. 49, no. 22, pp. 11491–11505, Nov. 2010, doi: 10.1021/ie1010993.
- [25] D. C. Cafaro and J. Cerdá, "A Rigorous Mathematical Formulation for the Scheduling of Tree-Structure Pipeline Networks," *Ind Eng Chem Res*, vol. 50, no. 9, pp. 5064–5085, May 2011, doi: 10.1021/ie101462k.
- [26] D. C. Cafaro and J. Cerdá, "Rigorous scheduling of mesh-structure refined petroleum pipeline networks," *Comput Chem Eng*, vol. 38, pp. 185–203, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.compchemeng.2011.11.007.
- [27] S. N. B. Magatão *et al.*, "Planning and Sequencing Product Distribution in a Real-World Pipeline Network: An MILP Decomposition Approach," *Ind Eng Chem Res*, vol. 51, no. 12, pp. 4591–4609, Mar. 2012, doi: 10.1021/ie2010252.

- [28] S. N. B. Magatão, L. Magatão, F. Neves-Jr, and L. V. R. Arruda, “Novel MILP Decomposition Approach for Scheduling Product Distribution through a Pipeline Network,” *Ind Eng Chem Res*, vol. 54, no. 18, pp. 5077–5095, May 2015, doi: 10.1021/ie5046796.
- [29] H. L. Polli, L. Magatão, S. N. B. Magatão, F. Neves, and L. V. R. Arruda, “Collaborative Approach Based on Heuristic Algorithm and MILP Model To Assignment and Sequencing of Oil Derivative Batches in Pipeline Networks,” *Ind Eng Chem Res*, vol. 56, no. 9, pp. 2492–2514, Mar. 2017, doi: 10.1021/acs.iecr.6b03516.
- [30] P. M. Castro, “Optimal Scheduling of Multiproduct Pipelines in Networks with Reversible Flow,” *Ind Eng Chem Res*, vol. 56, no. 34, pp. 9638–9656, Aug. 2017, doi: 10.1021/acs.iecr.7b01685.
- [31] Q. Liao, H. Zhang, Y. Wang, W. Zhang, and Y. Liang, “Heuristic method for detailed scheduling of branched multiproduct pipeline networks,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 140, pp. 82–101, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.cherd.2018.10.003.
- [32] L. Bueno, L. Magatão, L. V. R. Arruda, F. Neves, A. Monteiro, and J. P. Vaqueiro, “Assigning and sequencing batches and blends of oil derivatives in a mesh-like pipeline network,” *Comput Chem Eng*, vol. 139, p. 106894, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.compchemeng.2020.106894.
- [33] M. Gendreau and J. Y. Potvin, “Tabu Search,” *Search Methodologies: Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques*, pp. 165–186, 2005, doi: 10.1007/0-387-28356-0_6.
- [34] Lanner, “WITNESS Simulation Modeling Software.” Accessed: Sep. 29, 2023. [Online]. Available: <https://www.lanner.com/en-gb/technology/witness-simulation-software.html>
- [35] J. F. Noguera and S. Leirens, “Modelling and simulation of a multi-commodity pipeline network,” in *2010 IEEE ANDESCON*, IEEE, Sep. 2010, pp. 1–6. doi: 10.1109/ANDESCON.2010.5633298.
- [36] MathWorks, “MATLAB.” Accessed: Oct. 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [37] A. Muzy and D. R. C. Hill, “What is new with the activity world view in modeling and simulation? using activity as a unifying guide for modeling and simulation,” in *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC)*, IEEE, Dec. 2011, pp. 2882–2894. doi: 10.1109/WSC.2011.6147991.
- [38] D. Shibata, D. Alfenas, R. Guiraldelli, M. R. Pereira-Barretto, and F. Marcellino, “Activity based scheduling simulator for product transport using pipeline networks,” in *Proceedings Title: Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC)*, IEEE, Dec. 2012, pp. 1–12. doi: 10.1109/WSC.2012.6465127.
- [39] R. F. S. Costa, C. F. Araujo, A. A. de M. Freitas, C. D. P. Limoeiro, and D. B. Fuller, “Simulation model for regional oil derivatives pipeline networks considering batch scheduling and restricted storage capacity,” in *Proceedings of the Winter Simulation Conference 2014*, IEEE, Dec. 2014, pp. 2025–2035. doi: 10.1109/WSC.2014.7020048.
- [40] M. Ortega-Mier, Á. García-Sánchez, and A. Goti, “Use a simulation tool for multi-commodity pipeline scheduling,” *Hydrocarbon Processing*, vol. 92, pp. 41–48, 2013.

- [41] R. Geramianfar, M. R. Pakzad, and R. Tavakkoli-moghaddam, "Multi-product pipeline scheduling using simulation optimization," *Caspian Journal of Applied Sciences Research*, vol. 4, no. 3, pp. 8–18, 2015.
- [42] Rockwell Automation, "Arena Simulation Software." Accessed: Oct. 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.rockwellautomation.com/en-us/products/software/arena-simulation.html>
- [43] OptTek, "OptQuest – Optimization of Complex Systems." Accessed: Oct. 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.opttek.com/products/optquest/>
- [44] P. Wang, G. Zhao, X. Cao, and W. Wang, "The Design and Implementation of Gas and Liquid Flow Simulation System in Pipeline Network," in *Proceedings of the 2016 International Conference on Engineering Science and Management*, Paris, France: Atlantis Press, Aug. 2016, pp. 300–303. doi: 10.2991/esm-16.2016.69.
- [45] L. Bueno *et al.*, "Simulating the transport of heavy oil derivatives in a Brazilian pipeline network," in *2016 12th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, IEEE, Nov. 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/INDUSCON.2016.7874501.
- [46] L. Bueno, "An optimization approach for scheduling heavy oils transportation through a mesh-like pipeline network," Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Accessed: Oct. 03, 2023. [Online]. Available: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/23590>
- [47] D. Strachotova and J. Dyntar, "Support of Scheduling of Multiproduct Pipeline Systems Using Simulation in Witness," *International Journal of Simulation Modelling*, vol. 20, no. 3, pp. 536–546, Sep. 2021, doi: 10.2507/IJSIMM20-3-570.
- [48] Simul8 Corporation, "Simul8 - Fast, Intuitive Simulation Software for Desktop and Web." Accessed: Oct. 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.simul8.com/>
- [49] A. Daneels and W. Salter, "What is SCADA?," 1999, Accessed: Jul. 17, 2024. [Online]. Available: <https://cds.cern.ch/record/532624/files/mc1i01.pdf>
- [50] B. Csontos and I. Heckl, "Example of monthly scheduling plan resources 2022." Accessed: Aug. 15, 2022. [Online]. Available: <https://dcs.uni-pannon.hu/files/docs/users/csontosb/example-of-monthly-scheduling-plan-resources-2022.xlsx>
- [51] B. Csontos, L. Halász, and I. Heckl, "Event-driven simulation of liquid transportation through pipeline networks for oil companies," *Chem Eng Trans*, vol. 70, pp. 1741–1746, Aug. 2018, doi: 10.3303/CET1870291.
- [52] B. Csontos and I. Heckl, "Event-driven simulation of liquid transportation through pipeline networks for oil companies," in *PRES 2018 (21st Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction)*, Prague, Czech Republic, 2018.
- [53] B. Csontos and I. Heckl, "Simulation models for transporting oil materials in pipelines," *Proceedings of the Pannonian Conference on Advances in Information Technology (PCIT'2019)*, vol. 1, pp. 139–144, 2019.
- [54] B. Csontos and I. Heckl, "Simulation models for transporting oil materials in pipelines," in *Pannonian Conference on Advances in Information Technology (PCIT 2019) Veszprém, Hungary*, 2019.

- [55] B. Csontos, L. Halász, and I. Heckl, "Improved event-driven simulation method for fuel transport in a mesh-like pipeline network," *Comput Chem Eng*, vol. 168, p. 108066, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.COMPCHEMENG.2022.108066.
- [56] B. Csontos and I. Heckl, "Custom simulator for validating pipeline schedule in the oil industry," in *EDSI 2022 - EDSI 12th Annual Meeting, Ireland, Dublin, 2022*.