



SZÉCHENYI
ISTVÁN
EGYETEM



SZAKDOLGOZAT

Throughput maximalizálás szakaszos üzemű rendszerekben

Molnár Gergő

Mérnök Informatikus BSc szak

2019

Nyilatkozat

Alulírott, Molnár Gergő (RV3N4S), Mérnök Informatikus, BSc szakos hallgató kijelentem, hogy a Throughput maximalizálás szakaszos üzemű rendszerekben című szakdolgozat feladat kidolgozása a saját munkám, abban csak a megjelölt forrásokat, és a megjelölt mértékben használtam fel, az idézés szabályainak megfelelően, a hivatkozások pontos megjelölésével.

Eredményeim saját munkán, számításokon, kutatáson, valós méréseken alapulnak, és a legjobb tudásom szerint hitelesek.

Győr, [beadás dátuma]

hallgató

Kivonat

Throughput maximalizálás szakaszos üzemű rendszerekben

Szerző: Molnár Gergő, mérnökinformatikus BSc

Témavezető: Dr. Hegyháti Máté, tudományos főmunkatárs

Munka helyszíne: Széchenyi István Egyetem, Informatika tanszék

Gyártórendszerek optimális ütemezéséhez több módszer is rendelkezésre áll, mint például MILP modellek, vagy az általam részletebben tanulmányozott S-gráf módszertan. Ezeknek közös jellemzője, hogy nagyméretű gyártási feladatok során nem képesek az optimális megoldást megtalálni elfogadható időn belül.

Munkám során azzal foglalkoztam, hogy a szakaszos üzemű rendszerek esetében hogyan lehet a különböző kapacitással rendelkező berendezéseket egyazon feladatokhoz hozzárendelni. Azért erre a témára esett a választásom, mert előfeldolgozó lépés nélküli algoritmus még nem volt kidolgozva és a keretrendszerbe implementálva.

A dolgozatomban szemléltetem a megismert megoldó módszereket. Kiemelt figyelmet fordítottam az S-gráf keretrendszerre, valamint az ehhez kapcsolódó algoritmusokra. Ezeket követően bemutatom az új algoritmust, majd az implementálás részleteit. Az implementáció során a korábban az S-gráf keretrendszerhez elkészített kód refaktorálására is sor került, hogy az új módszert is megfelelően lehessen végrehajtani.

Az algoritmus helyes működését tesztfeladatokkal szemléltetem, melyek során különböző, a végeredményeket befolyásoló adatok megváltoztatásának hatását is bemutatom.

Munkám eredményeképpen az S-gráf keretrendszeren alapuló megoldó szoftver képes párhuzamos hozzárendeléseket megengedő feladatok megoldására.

Kulcsszavak: ütemezés, S-gráf, flexibilis batch, profit maximalizálás, optimalizálás

Abstract

Throughput maximization in batch production systems

There are many available methods for optimizing the schedule of manufacturing systems, such as MILP models or the S-graph methodology, which I have studied in more detail. Their common feature is that they are not able to find the optimal solution within an acceptable amount of time during large-scale manufacturing tasks.

During my work I studied how is it possible to assign the units with different capacity to the same tasks in batch production systems. I have chosen this topic because an algorithm without preprocessor have not been developed and implemented in a framework yet.

In my thesis I demonstrate the solving methods which I got to know. The S-graph framework and the related algorithms get special attention. After that, I present the new algorithm and the details of the implementation. During the implementation the refactoring of the code took place which was previously prepared for the S-graph framework. The goal of it was that the new method can be properly executed.

I illustrate the correct operation of the algorithm with test cases, during which I demonstrate the effect of changing the data affecting the end results.

As a result of my work, the solver software based on the S-graph framework can solve the problems with parallel assignments.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
2. Irodalmi áttekintés	3
2.1. Ipari ütemezési feladatok	3
2.2. Megoldó módszerek	7
2.2.1. MILP modellek	7
2.2.2. Analízis alapú eszközök	8
2.2.3. S-gráf módszertan	8
2.2.4. A makespan minimalizálás algoritmusai	12
2.3. Throughput vagy profitmaximalizálás	13
3. Probléma definíció	16
4. Az új módszer	20
5. Implementálás	24
5.1. S-gráf solver	24
5.2. Adatok beolvasása	25
5.2.1. Bemeneti fájl	25
5.2.2. Beolvasó függvény	26
5.3. FlexBatchSchProblem osztály	27
5.3.1. MakeDecisions függvény	28
5.3.2. Branching függvény	29
5.3.3. További metódusok	29

5.4. SGraph osztály	30
5.4.1. MakeMultipleBatches függvény	31
5.4.2. UpdateProfitBound függvény	34
5.4.3. UpdateProfitBoundFromTask függvény	36
5.4.4. Egyéb új metódusok	37
5.5. Argumentum hozzáadás	37
5.6. Megoldás fájlba írása	38
6. Tesztelés	39
6.1. Taszkok közti kapacitások változtatásának hatása	41
6.2. Időhorizont változtatás	45
6.3. Második tesztfeladat	46
7. Összefoglalás	50
A. Tesztesetek	53
B. CD Melléklet tartalma	55

Ábrák jegyzéke

2.1. Különböző receptek szemléltetése	5
2.2. A receptgráf szemléltetése	9
2.3. Az ütemezési gráf szemléltetése	10
2.4. E2-es berendezés által elvégzett részfeladatok	11
2.5. Egy ütemezés Gantt diagramon való megjelenítése	11
2.6. A makespan minimalizáló algoritmus pszeudó kódja [1]	13
2.7. A jövedelem maximalizáló algoritmus pszeudó kódja [1]	14
2.8. Throughput maximalizálás szemléltetés	15
3.1. Kondili példafeladata	17
5.1. Példafeladat	34
6.1. Tesztfeladat	41
6.2. Első feladat bemeneti adatai	42
6.3. A megoldást tartalmazó fájl első része	43
6.4. A megoldást tartalmazó fájl második része	43
6.5. A megoldást tartalmazó fájl harmadik része	44
6.6. A solver által elkészített Gantt diagram	45
6.7. Második tesztfeladat	46
A.1. Nyolcadik teszteset bemeneti adatai	53

Táblázatok jegyzéke

3.1. A 27 állandó recept Kondili példájához	18
3.2. Nem dominált esetek bevétel szerint növekvő sorrendben	19
3.3. Összevont, nem dominált esetek bevétel szerint növekvő sorrendben	19
5.1. A taszkokhoz tartozó azonosítók	34
6.1. Adott időhorizont alatt elérhető bevételek	46
6.2. Második példafeladat tesztesetei	47
A.1. Második példafeladat teszteseteinek második fele	54

1. fejezet

Bevezetés

Az ütemezés feladatával az élet számos területén találkozunk, kezdve az egyszerű, hétköznapi problémáktól, mint például egy napon elvégzendő feladataink sorrendjének beosztásával kezdve, professzionális sportcsapatok heti edzésprogramjának kialakításán át, egészen az ipari üzemek működéséig, ahol a rendelkezésre álló berendezésekhez kell rendelni az előállítani kívánt termékeket. Bár az életünk különböző területein fellépő problémák különböznek egymástól, bizonyos mértékben hasonlóság is fellelhető közöttük. Különbség lehet az ütemezési feladatok célfüggvénye, továbbá az adott ütemezési probléma lehet online, offline, illetve sztochasztikus vagy determinisztikus. Minden fellépő probléma esetében az a cél, hogy az elvégzendő feladatokat a rendelkezésre álló erőforrások között megosszuk oly módon, hogy adott intervallumon belül a lehető legjobb megoldást kapjuk, miközben a folyamat során megjelenő, fellépő korlátokat betartjuk, azokat nem sértjük meg. Az ipari ütemezés két leggyakoribb célja a makespan minimalizálás, és a throughput maximalizálás. A makespan kifejezést az idő minimalizálására, a throughput kifejezést pedig a profit maximalizálásra alkalmazzák az irodalomban.

Az ipari gyártási folyamatok ütemezésére különböző módszerek léteznek már. Ezek közé tartoznak a MILP megoldó módszerek, amelyek a lineáris programozáson alapulnak. Továbbá ide sorolható az időzített automaták, Petri hálók, valamint a S-gráf megoldó módszer, amely a munkám során a legfontosabb szerepet tölti be a felsorolt megoldó módszerek közül. Dolgozatom második fejezetében ezek kerülnek bemutatásra. A harmadik részben a probléma kerül definiálásra. A negyedikben az általam megvalósított

módszer elmélete található. Az ötödik fejezetben a módszer megvalósítását mutatom be. A hatodik fejezetben tesztelésről, és az eredmények összehasonlításáról lesz szó. A dolgozat végén található az összefoglalás a munkámról, a hivatkozások, valamint a függelék.

2. fejezet

Irodalmi áttekintés

2.1. Ipari ütemezési feladatok

Az ipari folyamatokat gyártásnak nevezzük, amely során az elkészítendő termék létrehozása, megvalósítása a feladat. Ehhez szükség van arra, hogy megfelelően vegyük igénybe a rendelkezésre álló erőforrásokat, amelyeket berendezéseknek, unitnak nevezünk a gyártási feladatok során. A folyamat során fellépő feladatokra a taszk elnevezés is használható. Minden ütemezési feladat rendelkezik végrehajtási idővel, ami megmutatja mekkora időtartam alatt valósítható meg. Ezenfelül lehet még a feladatoknak olyan időkorlátja, ami alatt kötelező elvégezni a feladatot, ezt időhorizontnak, time horizonnak hívjuk. A problémák kimenetelük szerint lehetnek megvalósíthatatlan (infeasible) és megvalósítható (feasible) feladatok. Ha egy korlátozásnak sem felel meg az adott probléma akkor infeasible, egyéb esetekben pedig már megvalósíthatóként kezeljük.

Az ipari folyamatokat többféleképpen lehet csoportosítani. Az egyik felosztási módszer szerint folyamatos és szakaszos üzemű rendszerek csoportjára bontjuk őket. Az első típusban az anyag folyamatosan kerül a rendszerbe, a másodikban pedig ez a folyamat lépésekben valósul meg. A munkám az utóbbi típusba tartozó feladatokra koncentrál. Másik lehetséges felosztás az, amikor online, offline, és semi-offline kategóriákba vannak a feladatok besorolva. Az offline esetben minden szükséges bemeneti adat rendelkezésre áll az optimalizálás idejében. Az online ezzel szemben úgy működik, hogy előbb kell döntéseket meghozni, minthogy adott paraméterekhez tartozó értékekre fény derülne. A

semi-offline a kettő közé sorolható, azaz bizonyos információk, adatok már rendelkezésre állnak, mások viszont nem. Egy harmadik besorolási lehetőség, hogy megkülönböztetünk sztochaikus és determinisztikus feladatokat. Sztochaikus esetekben a paraméterek már futás közben kapnak értéket. Ezzel szemben a determinisztikus feladatok értékei előre meg vannak határozva és beállítva.

Az ütemezési feladatok modelljét receptnek nevezzük. Egy termék receptje tartalmazza az adott recept által előállítható termék elkészítéséhez szükséges információkat [1]. Egy receptet a következő elemek közösen alkotják:

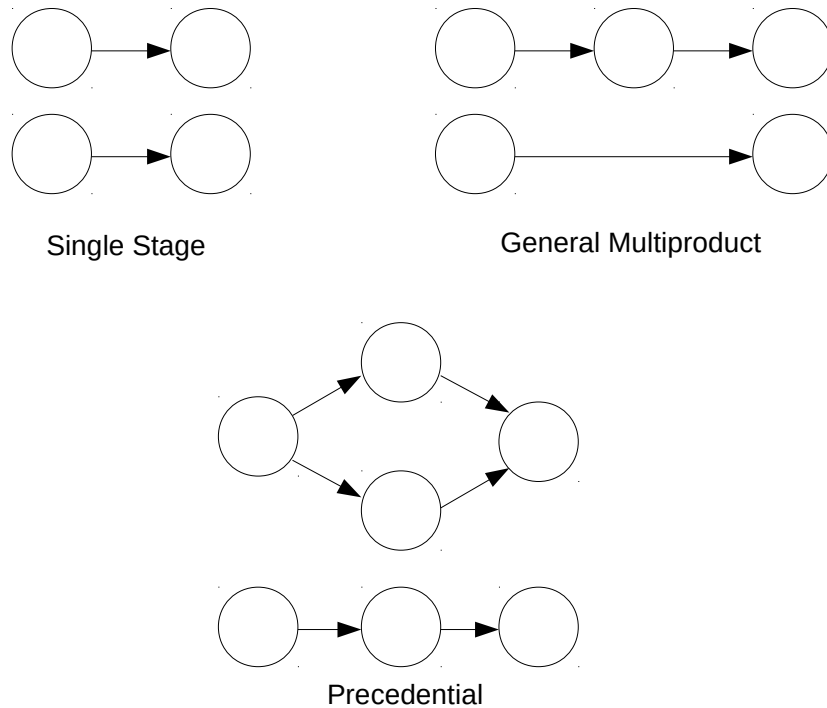
- termékek listája,
- taszkok listája, amelyek adott sorrendben történő elvégzése szükséges a termékek előállításához,
- taszkok egymás közötti sorrendisége, amely megmutatja a taszkok sorrendjét,
- rendelkezésre álló berendezések,
- a lehetséges taszk-berendezés párok feldolgozási ideje.

A recepteket a feladatok precedenciája szerint az alábbi csoportokba lehet besorolni. A felsorolás a legegyszerűbbtől halad az általánosabb felé. Ezen kívül minden osztály a következőnek egy speciális esete.

- **Single Stage:** Egy lépésben állítható elő minden egyes termék.
- **Simple Multiproduct:** Minden terméket meghatározott számú fázison, szakaszon keresztül lehet elkészíteni. Előzővel szemben itt már nem csak egy lépésben lehetséges.
- **General Multiproduct:** Előzővel összehasonlítva az a különbség, hogy ennél lehetséges lépések kihagyása.
- **Multipurpose:** A termékek gyártásának lépéseit nem lehet egy balról jobbra tartó vonal mentén véghez vinni. A szakaszok száma és iránya tetszőleges, sőt egy szakasz többször is ismétlődhet ugyanabban a gyártásban.

- **Precedential:** A gyártásban résztvevő taszkok nincsenek hozzárendelve a szakaszokhoz. Egy termék gyártása nem szükségszerűen lineáris, lehetnek elágazások, kör azonban nem megengedett. Minden taszk előfeltételét be kell fejezni mielőtt az adott lépés megkezdődik.
- **General Network:** A legáltalánosabb recept, ahol a taszkok a bemenetük és a kimenetük által adottak. Ilyen esetben kör is lehetséges.

Néhány előbb említett feladattípus szemléltetése látható a 2.1 ábrán. A receptek jobb oldalán lévő kör jelenti a terméket, a többi pedig a taszkokat.



2.1. ábra. Különböző receptek szemléltetése

A vegyipari, gyártási ütemezési feladatoknál nagy szerepet játszik a tárolási irányelv, amely azt mutatja meg, hogy két egymást követő feladatok között az elkészített köztes termékeket, hogyan kell raktározni, tárolni, illetve ez mennyi ideig lehetséges. A tárolási stratégiák csoportosítására többféle lehetőség van. Egyik ezek közül, amikor az adott létesítmény infrastrukturális képességei korlátozzák az anyag mennyiségét és minőségét.

- **UIS - Unlimited Intermediate Storage**
- **FIS - Finite Intermediate Storage**
- **NIS - No Intermediate Storage**

Az UIS eset a legegyszerűbb. Ebben az esetben van lehetőség a köztes anyagok bármely mértékű tárolására. FIS esetben van lehetőség a tárolásra, de csak korlátozott mennyiségben. A NIS esetében nincs külön tárolásra alkalmas egység, de az megoldható, hogy amíg a következő feldolgozó egységhez kerül, addig az előző helyen várakozzon.

A tárolás második fajta csoportosítási lehetősége az, amikor az idő ad korlátot.

- **UW - Unlimited Wait**
- **LW - Limited Wait**
- **ZW - Zero Wait**

ZW esetben nincs lehetőség a köztes anyag tárolására, azaz ha a berendezés befejezte a munkát, akkor azonnal folytatni kell a gyártást. Az LW esetben van egy idő, amíg a köztes termék várakozhat. Azonban, ha ez a rendelkezésre álló idő elfogy, akkor muszáj folytatni a gyártás folyamatát. Az UW eset a legegyszerűbb mind közül, ugyanis ha a köztes anyag tulajdonságai lehetőséget biztosítanak, akkor a tárolási idő nincs korlátozva, bármennyi ideig lehetőség van a tárolásra, raktározásra.

2.2. Megoldó módszerek

Az ütemezési feladatok megoldására számos megoldó módszer létezik. Ezek közül a legismertebbek, és legszélesebb körben elterjedt módszerek kerülnek bemutatásra a dolgozatom következő pontjaiban.

2.2.1. MILP modellek

A legtöbb ütemezési probléma modelljében vegyesen fordulnak elő folytonos és egész változók. Ilyen esetekben beszélünk vegyes egészértékű lineáris programozásról, azaz **Mixed Integer Linear Programming**-ről, amelynek több altípusa létezik:

Időfelosztásos modellek - Time discretization based: A módszer időpontokat és időrészeket határoz meg. Ezek a modellek jelentek meg legkorábban kronológiailag [2]. Az időrészen és az időponton alapuló megközelítések sok hasonlóságot mutatnak, mivel egy időintervallumtól egy másikig terjedő időintervallumot tekinthetünk időrésznek [3]. Ellenkező irányból nézve pedig egy időrés kezdő időpontját tekintjük egy időpontnak.

Minden időpontban bináris változók vannak hozzárendelve aszerint, hogy az adott időpillanatban kezdődik a feladat végrehajtása vagy nem. A bináris változók száma arányos lesz az időpontok számával. Mindig megvolt a szándék olyan módszer kifejlesztésére, amelyben a szükséges időpontok száma minél kisebb legyen amellet, hogy megtalálja az optimális megoldást.

Precedencia alapú modellek - Precedence based: Ezeknél a módszereknél, szemben az időfelosztásos módszerekkel, nincs szükség az időhorizont diszkretizációjára, azaz nem használnak ismeretlen paramétert a modellben. Általánosságban jobb számítási eredményeket nyújtanak az általuk kezelt problémákra, azonban ez a készlet sokkal kisebb, mint az időfelosztásos modellekhez tartozó kollekció. Alapvetően a multiproduct és multipurpose receptek esetében használható megfelelően, de kibővíthető, hogy a sokkal általánosabb precedential receptek is megoldhatók legyenek ezek segítségével.

Ez a módszer kettő darab bináris változót használ. Az első $Y_{i,j}$, aminek az értéke abban az esetben lesz 1, ha i feladatot j berendezés végzi el. A második változó: $X_{i,j,i'}$. Értéke akkor lesz 1, ha ugyanaz a berendezés végzi el az i és i' taszkot, még hozzá úgy, hogy előbb az i -t teljesíti.

2.2.2. Analízis alapú eszközök

Az automatákat és Petri hálókat széles körben alkalmazzák diszkrét eseményrendszerek modellezésére [4]. Számos kísérletet tettek ezen eszközök modellezési teljesítményének kiterjesztésére annak érdekében, hogy batch folyamatok ütemezésére is alkalmassá tegyék az említett eszközöket. A meglévő modelleket időzítéssel egészítették ki, így jöttek létre a Timed Place Petri Nets (TPPN) and Timed Priced Automata (TPA) módszerek, amelyek Branch and Bound algoritmust használnak azért, hogy a legelőnyösebb megoldást megtalálják. Ezen módszereknek a hatékonysága elmarad a MILP és az S-gráf modell hatékonyságától is.

Időzített automaták: Ezekben a megközelítésekben a recepteket és a berendezéseket külön modellezzik, és a rendszer modellje ezeknek a párhuzamos összetételével jön létre. A bonyolultságot az jelenti, hogy az órák állapota végtelen lehet, és emiatt a rendszer állapotterülete is az lehet.

Időzített Petri háló: Az alap ilyen módszereknél, hogy az átvitel jele késleltetés alapján jön létre. Többen is foglalkoztak a témával, például Ghaeli [5], aki batch folyamatok ütemezésével tanulmányozta.

2.2.3. S-gráf módszertan

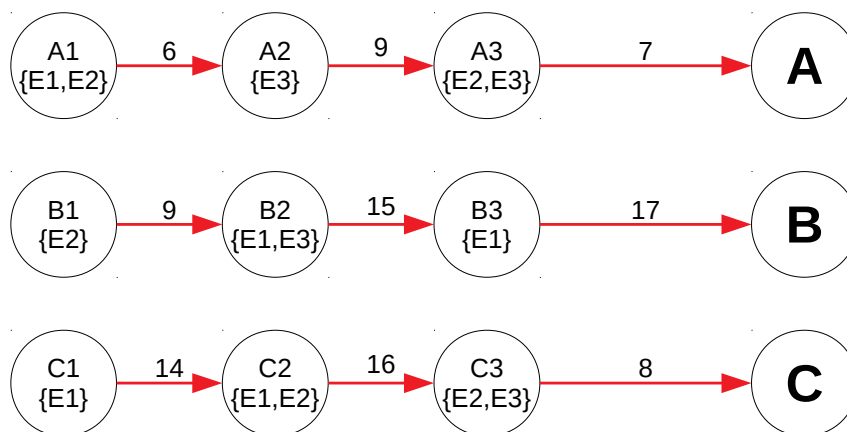
Az S-gráf keretrendszer volt az első olyan módszer, amely publikált gráf elméleten alapult, valamint szakaszos gyártórendszerek ütemezési problémáinak megoldására szolgált [6]. Ez a keretrendszer egy irányított gráf modellből, az S-gráfból, és a hozzá tartozó algoritmusokból áll [7]. Az S-gráf egy speciális irányított gráf, amely ütemezési problémák számára lett létrehozva. Nemcsak a recept vizualizációja, hanem egyben matematikai modell is.

A keretrendszerben az S-gráf reprezentálja a recepteket, a részleges és a teljes ütemterveket is. Ezekben a gráfokban a termékeket és a feladatokat csúcsok jelölik, amelyeket csomópontoknak (node) nevezünk. Ha két feladat között összeköttetés van, akkor ezt a gráfon lévő, feladatokat reprezentáló csomópontok között lévő nyíl mutatja. Az ütemezési döntés nélküli S-gráfot **Receptgráfnak** nevezzük. Erre példa a 2.2 ábrán látható [1].

A jobb oldalon látható három, nagybetűvel jelölt csomópont felel meg a termékeknek, a maradék kilenc pedig a részfeladatokat jelenti. Ezt a kilenc részfeladatot el kell végezni a termékek előállításának érdekében. Az élek (nyilak) a csomópontok közti függőséget mutatják meg. Ezeket **Receptéleknek** nevezzük. Kétfajta függőséget tudunk megkülönböztetni:

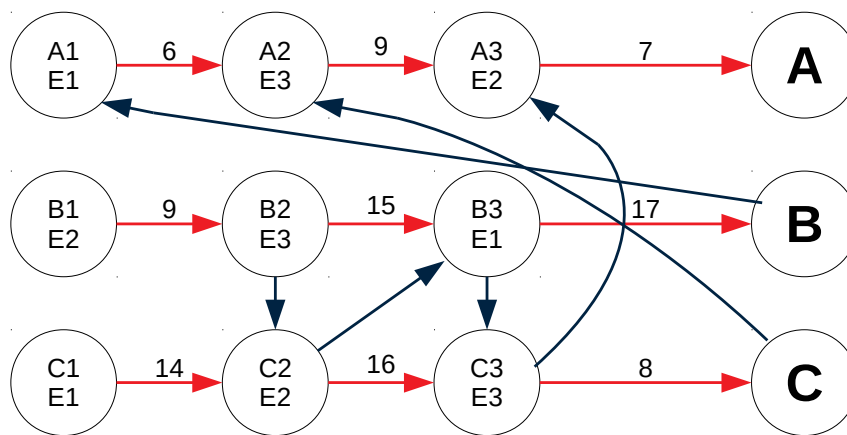
- Két részfeladat között van él. Ebben az esetben az egyik készíti el a másiknak a bemenetét.
- Egy termék és egy részfeladat között szerepel él. Ilyenkor a részfeladat készíti el a terméket.

A nyilakon látható súlyok a részfeladat végrehajtásához szükséges időt mutatják meg. Ha egy részfeladatot több berendezés is képes elvégezni, akkor az előbb említett súly mindig a legkisebb előállítási idő lesz.



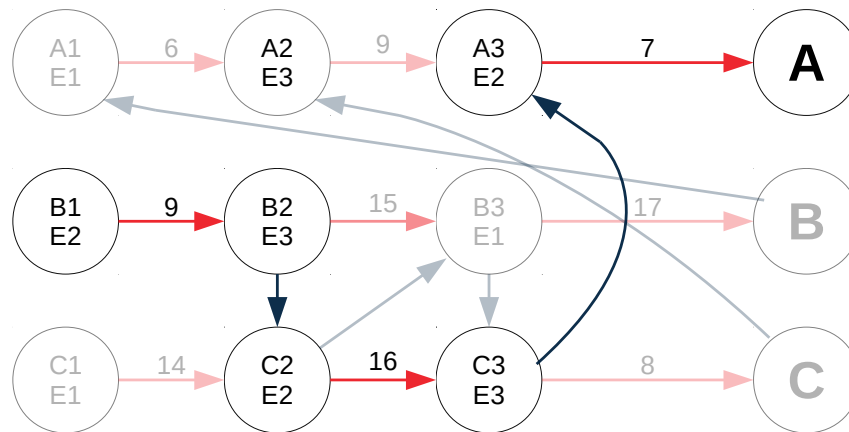
2.2. ábra. A receptgráf szemléltetése

Minden S-gráf-hoz kapcsolódó algoritmus kiegészíti ezeket a gráfokat az úgynevezett **ütemezési élekkel**, amelyek az ütemezési döntést testesítik meg. Ezekkel az élekkel kiegészített gráfoknak a neve **Ütemezési gráf**. Példa a 2.3 ábrán nézhető meg. Az ábrán sötétkékkel jelölt nyilak az ütemezési élek. Az ütemezési élek súlya alapértelmezetten nulla, ha a probléma nem tartalmaz szállítási, vagy tisztítási időt. A részfeladatok csomópontjain már nem a lehetséges berendezések halmaza látható, hanem egy konkrét kiválasztott berendezés, az ütemezési döntésnek megfelelően.



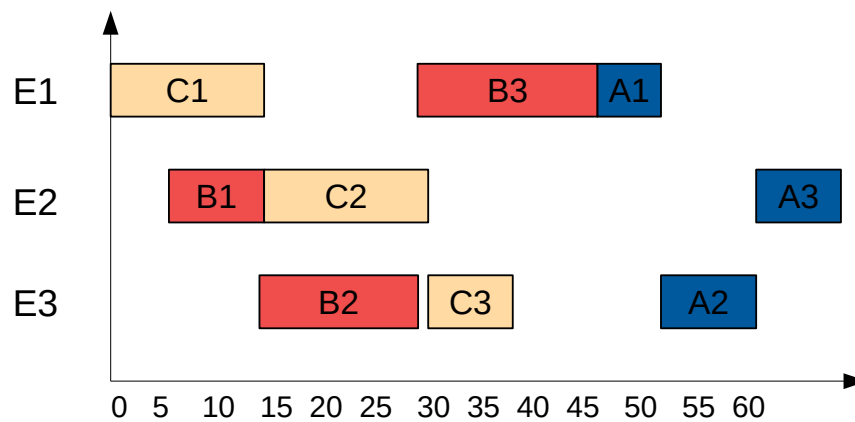
2.3. ábra. Az ütemezési gráf szemléltetése

Ugyanahhoz a berendezéshez rendelt részfeladatok végrehajtási sorrendje könnyedén leolvasható a gráfról. A 2.4 ábrán látható példában az E2-es berendezés által elvégzett részfeladatok sorrendje B1 -> C2 -> A3. Ahhoz, hogy a berendezés el tudjon végezni egy adott részfeladatot nem elég, hogy az általa végzett előző részfeladatot befejezze, hanem szükség van még ezen kívül arra, hogy a soron következő részfeladathoz szükséges összes részfeladat elkészüljön. Csak ezeket követően tudja megkezdeni az adott részfeladat végrehajtását. Példa: C2-es részfeladat végrehajtásához szükséges, hogy az E2-es berendezés befejezze a B1-es részfeladatot, valamint az is, hogy a C1-es részfeladatot elkészítse az E1-es berendezés.



2.4. ábra. E2-es berendezés által elvégzett részfeladatok

Gyakran használt mód az ütemezési feladatok ábrázolására a Gantt diagram [8], [9]. Ezeken a diagramokon a függőleges tengelyen a berendezések, míg a vízszintes tengelyen pedig az idő szerepel. Az ábrán látható erőforrások szemléltetik az erőforrások elfoglaltságát. Egy Gantt diagram látható a 2.5 ábrán.



2.5. ábra. Egy ütemezés Gantt diagramon való megjelenítése

2.2.4. A makespan minimalizálás algoritmus

Az algoritmus (2.6 ábra) első lépésben inicializálja a $makespan^{cb}$ értékét végtelennel, majd beállítja az S halmazt, amelyben az ütemezés során a nyitott részproblémák szerepelnek. Kezdetben csak a gyökér probléma szerepel benne, vagyis egy receptgráf bármilyen hozzárendelés nélkül. A **recipe** függvény visszaadja a $G(N, A_1, A_2, w)$ által jelzett probléma receptgráfját.

Az iteráció minden lépésében a **select_remove** függvénnyel egy tetszőleges részprobléma kerül kiválasztásra, majd az S -ből eltávolításra. Ennek a függvénynek a viselkedése a különböző megvalósításokban más és más lehet, ami más keresési stratégiát eredményez.

Az iteráció elején kiértékelődik, hogy a részprobléma képes-e optimális megoldást nyújtani, vagy sem. Ez a **bound** függvénnyel történik. A leggyakrabban a leghosszabb út keresésével vizsgálja meg a részproblémát a **bound** függvény, de lehetséges LP alapú modellek használata is. Ha a korlát nem kisebb, mint az eddig megtalált legjobb eredmény, akkor az iteráció véget ér, és amennyiben létezik egy következő részprobléma, az kerül kiválasztásra.

Ha viszont kisebb a korlát, akkor ellenőrzi az algoritmus azt, hogy az összes taszk már ütemezett-e, azaz a részprobléma teljesen ütemezett. Ha így van, a legjobb megoldás kerül frissítésre. Ha még szükséges további ütemezés, akkor a **select** függvény kiválaszt egy rendelkezésre álló berendezést a J' halmazból. A kiválasztott j berendezéshez az algoritmus hozzárendeli az összes lehetséges taszkot. Ezek kapnak egy másolatot az aktuális S -gráfról. Ezt kibővíti az új hozzárendelés alapján az ütemezési élekkel. Végezetül pedig az új részproblémát hozzáadja az S halmazhoz. Ha ez az S halmaz üres lesz, akkor a G^{cb} és a hozzárendelések leírják az optimális megoldást, és ha legalább egy megvalósítható, akkor az algoritmus visszatér ezzel az értékkel. Ellenkező esetben nem ad vissza semmit.

```

makespancb := ∞
S := {(recipe(), I, J, ∅)}
while S ≠ ∅ do
  (G(N, A1, A2, w), I', J', A) := select_remove(S)
  if bound(G) < makespancb then
    if I' = ∅ then
      makespancb := bound(G)
      Gcb := G
      Acb := A
    else
      j := select(J')
      for all i ∈ Ij ∩ I' do
        Gi(N, A1, A2i, wi) := G(N, A1, A2, w)
        for all i' ∈  $\bigcup_{(i',j) \in \mathcal{A}} I_{i'}^+ \setminus \{i\}$  do
          A2i := A2i ∪ {(i', i)}
        end for
        for all i' ∈ Ii+ do
          wi,i'i := ti,jpr
        end for
        S := S ∪ (Gi(N, A1, A2i, wi), I' \ {i}, J', A ∪ {(i, j)})
      end for
      if I' ⊆  $\bigcup_{j' \in J', j \neq j'} I_{j'}$  then
        S := S ∪ (G(N, A1, A2), I', J' \ {j}, A)
      end if
    end if
  end if
end while
if makespancb ≠ ∞ then
  return (Gcb, Acb)
end if

```

2.6. ábra. A makespan minimalizáló algoritmus pszeudó kódja [1]

2.3. Throughput vagy profitmaximalizálás

Eredetileg az S-gráf keretrendszer makespan minimalizációs problémák megoldására lett létrehozva, azonban a későbbiekben bővítésre került, így ezután throughput, profitmaximalizációs problémák megoldására is alkalmazhatóvá vált. Az alapötlet Majozsi és Friedler [10], valamint Holczinger [11] nevéhez fűződik.

```

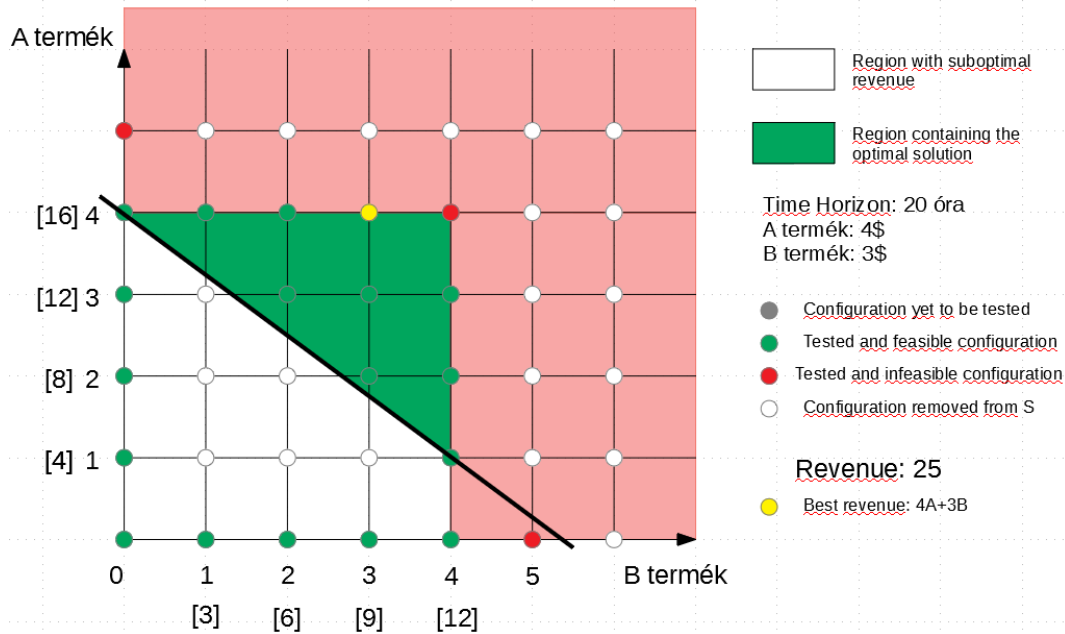
 $revenue^{cb} := 0$ 
 $S := (\mathbb{Z}^*)^{|P|}$ 
while  $S \neq \emptyset$  do
   $x := \text{select\_remove}(S)$ 
  if  $\text{feasible}(\text{recipe}(x), t^H)$  then
    if  $\text{revenue}(x) > revenue^{cb}$  then
       $revenue^{cb} := \text{revenue}(x)$ 
       $x^{cb} := x$ 
       $\text{update}(S, revenue^{cb})$ 
    end if
  else
     $S := \{x' \in S \mid x' \not\geq x\}$ 
  end if
end while
if  $revenue^{cb} \neq 0$  then
  return  $(x^{cb}, revenue^{cb})$ 
end if

```

2.7. ábra. A jövedelem maximalizáló algoritmus pszeudó kódja [1]

Az algoritmus először inicializálja az S halmazt a termékekre vonatkozóan minden lehetséges batch számmal. Fontos kiemelni, hogy ebben az esetben minden terméknél a batch méret rögzített. Ezt követően minden iteráció során az előbb említett halmazból kiválasztásra kerül egy konfiguráció a **select_remove** függvény segítségével. Ezután kerül feasibility tesztelésre, amely során eldől, hogy a megadott időhorizont alatt megvalósítható vagy sem. Ha megvalósítható és nagyobb jövedelmet biztosít, akkor a jelenlegi legjobb megoldás felülíródik. Ha infeasible a kiválasztott konfiguráció, akkor ez, és minden ennél nagyobb konfiguráció eltávolításra kerül az S halmazból. Amint az S halmaz üressé válik, és volt feasible megoldás, akkor az algoritmus visszatér a legjobb konfigurációval, és az ehhez tartozó jövedelem mennyiségével.

A 2.8 ábrán látható egy Throughput módszerrel megvalósított feladat eredménye.



2.8. ábra. Throughput maximalizálás szemléltetés

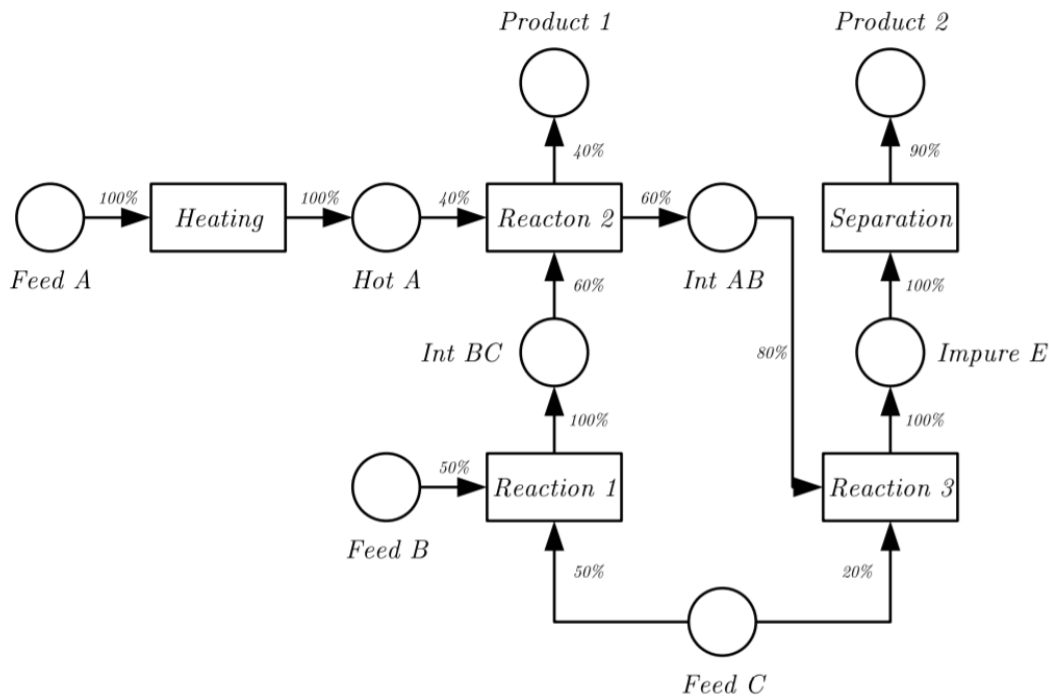
Az algoritmus először végighalad a tengelyek mentén, vagyis az egyik termék batch mérete 0 lesz, a másik pedig növekszik. Ezt a haladási irányt addig követi, amíg megtalálja az első nem megvalósítható, azaz infeasible konfigurációt. Ezt követően elvégzi a keresést a másik tengelyen is. Így kap egy jelenleg maximális jövedelmet. Az utolsó még feasible batch méreteknél nagyobb batch méreteket már nem kell vizsgálni, hiszen azokat a megadott időhorizonton belül nem lehet megvalósítani. A képen látható feladatban ez 16 volt. A két tengelyen lévő 16 értékhez tartozó batch méretet összeköti egy vonallal. Jelenlegi példában a B termékhez tartozó 16-os érték nem egész batch mérethez tartozik, a legközelebbi a 15-tel rendelkező, ami infeasible már. A behúzott vonal alatt azok a konfigurációk szerepelnek, amelyek jövedelme nem éri el a jelenlegi maximumot, így ezek nem a lehető legjobb megoldást adják meg. Az algoritmus addig folytatja a futást, amíg a halmaz, amely a konfigurációkat tartalmazza ki nem ürül. Ha nem talált megvalósítható konfigurációt, akkor az adott problémát a megadott időhorizonton belül nem lehet megoldani. Ellenkező esetben az algoritmus megadja az elérhető legnagyobb profitot és a konfigurációt, amellyel ez elérhető. A példafeladatban a maximálisan elérhető jövedelem 25 egység. Ezt 4 darab A termék és 3 darab B termék legyártásával lehet elérni.

3. fejezet

Probléma definíció

Számos esettanulmány és irodalmi példa esetében a batch méretek nem rögzítettek, és ha több egység képes elvégezni egy részfeladatot, akkor párhuzamosan tehetik meg azt. Ez a fajta probléma meghatározás különösen gyakran a throughput vagy bevétel maximalizációs probléma esetén jelentkezik, de megjelenhet a makespan minimalizálásnál is. Az idő diszkréción alapuló megközelítések meg tudják oldani ezt a problémát, azonban az S-gráf keretrendszer esetén néhány módosítás szükséges. Az 2.7 ábrán látható algoritmus megköveteli, hogy a recept rögzített legyen, valamint egy termékhez tartozó batch jövedelme is előre ismert legyen. Az előbb említett problémák esetén viszont egyik sem garantált. A javasolt megközelítés szemléltetésére a Kondili és munkatársaitól származó példát veszem igénybe [2]. Ez látható 3.1 ábrán.

A folyamat 5 taszkból áll: fűtésből, 3 darab reakcióból, és az elválasztásból. Ezekhez 4 berendezés áll rendelkezésre: a fűtőtest és szeparátor, mindkettő 100 kilogrammos kapacitással a fűtés és elválasztás folyamatához. A három reakciós folyamathoz van 2 darab reaktor ugyanakkora feldolgozási idővel. A kapacitásuk eltér, egyiké 80 kilogramm a másiké pedig 50 kilogramm, de ezeket a reaktorokat párhuzamosan is igénybe lehet venni. Feltételezzük, hogy az összes egység képes a kapacitásuknál kisebb terheléssel működni, azaz nincs a teherbírásuknak alsó határa. A folyamat során két termék készül azonos profittal. A következő korlátozások fennállnak: nem marad semmilyen köztes anyag a termelő folyamat végén, nem lehet csak az egyes számú terméket gyártani, illetve nincs tárolásra lehetőség a folyamat során.



3.1. ábra. Kondili példafeladata

Mindegyik reakciós folyamat elvégezhető egyik vagy másik reaktor által, illetve ezekkel párhuzamosan. Ez $3^3 = 27$ fix receptet eredményez, amelyek különböző batch méret intervallummal rendelkezhetnek. Mindegyik esetben különálló S-gráf receptet kell létrehozni, hogy a korábban említett S-gráf algoritmust igénybe lehessen venni profit maximalizálásra, így a keresési terület 27 dimenziós térré válna. Ez óriási CPU igényhez vezetne az optimalizálás során, ezért az esetek számának csökkentése elengedhetetlen.

3.1. táblázat. A 27 állandó recept Kondili példájához

Eset	Reakció 1	Reakció 2	Reakció 3	Max bevétel
1	R1	R1	R1	86,00
2	R1	R1	R2	71,67
3	R1	R1	R1&R2	86,00
4	R1	R2	R1	53,75
5	R1	R2	R2	53,75
6	R1	R2	R1&R2	53,75
7	R1	R1&R2	R1	114,76
8	R1	R1&R2	R2	71,67
9	R1	R1&R2	R1&R2	139,75
10	R2	R1	R1	86,00
11	R2	R1	R2	71,67
12	R2	R1	R1&R2	86,00
13	R2	R2	R1	53,75
14	R2	R2	R2	53,75
15	R2	R2	R1&R2	53,75
16	R2	R1&R2	R1	89,58
17	R2	R1&R2	R2	71,67
18	R2	R1&R2	R1&R2	89,58
19	R1&R2	R1	R1	86,00
20	R1&R2	R1	R2	71,67
21	R1&R2	R1	R1&R2	86,00
22	R1&R2	R2	R1	53,75
23	R1&R2	R2	R2	53,75
24	R1&R2	R2	R1&R2	53,75
25	R1&R2	R1&R2	R1	114,76
26	R1&R2	R1&R2	R2	71,67
27	R1&R2	R1&R2	R1&R2	139,75

Ha megnézzük a 3.1 táblázatot észrevehetők, hogy csupán néhány érték ismétlődik. Ennek oka az anyagok egyensúlyából származik. Például, hogy ha mind az R1-et mind az R2-t hozzárendeljük a hármas számú reakcióhoz ahelyett, hogy csak az R1 lenne hozzárendelve, akkor sem lesz nagyobb a kimenet, mert a korábbi reakciókból származó pótlás nem éri el a szükséges szintet. Ha a két különböző eset, c és c' , ugyanakkora maximális jövedelemmel rendelkezik, de a c eset csak kisebb részét használja a c' által használt egységeknek, ekkor az mondjuk, hogy a c *dominálja* a c' -t. A példából látható, hogy a 9-es eset dominálja a 27-es esetet. Továbbá a 24-es eset dominálva van a 4, 5, 6, 13, 14, 15, 22, 23 esetek által. Megállapíthatjuk, hogy ha egy eset legalább egy másik által dominálva van, akkor

azt kizárhatjuk a vizsgálatból, mert az továbbra is garantálva van, hogy megtalálja az optimális megoldást. A 3.3 táblázat tartalmazza azokat az eseteket, amelyek nincsenek dominálva más esetek által.

3.2. táblázat. Nem dominált esetek bevétel szerint növekvő sorrendben

Eset	Reakció 1	Reakció 2	Reakció 3	Max bevétel
4	R1	R2	R1	53,75
5	R1	R2	R2	53,75
13	R2	R2	R1	53,75
14	R2	R2	R2	53,75
2	R1	R1	R2	71,67
11	R2	R1	R2	71,67
1	R1	R1	R1	86,00
10	R2	R1	R1	86,00
16	R2	R1&R2	R1	89,58
7	R1	R1&R2	R1	114,67
9	R1	R1&R2	R1&R2	139,75

Ezután a esetszám csökkenés után is még mindig 11 esetet kellene az S-gráf algoritmusnak megvizsgálni. Annak érdekében, hogy tovább csökkenjen ez a szám több esetet is össze lehet vonni. Például a 4-es és 5-ös eset teljes mértékben megegyezik, azzal a kivétellel, hogy a harmadik reakciós folyamatot más reaktor végzi. Ezt a két esetet össze lehet vonni úgy, hogy a harmadik reakciónál R1 vagy R2-es reaktor ($R1 \vee R2$) üzemel. A 3.3 táblázatban látható a végleges összevonás eredménye.

3.3. táblázat. Összevont, nem dominált esetek bevétel szerint növekvő sorrendben

Eset	Reakció 1	Reakció 2	Reakció 3	Max bevétel
4,5,13,14	$R1 \vee R2$	R2	$R1 \vee R2$	53,75
2,11	$R1 \vee R2$	R1	R2	71,67
1,10	$R1 \vee R2$	R1	R1	86,00
16	R2	R1&R2	R1	89,58
7	R1	R1&R2	R1	114,67
9	R1	R1&R2	R1&R2	139,75

4. fejezet

Az új módszer

Az új algoritmus alapját a 2.6 ábrán látható makespan minimalizáló algoritmus képezi. Az újonnan létrehozott algoritmus korlátját már nem a makespan adja, hanem a jövedelmek. További változtatás, hogy egy taszkot nem csak egy berendezés tud végrehajtani, hanem a különböző kapacitású berendezések képesek az adott taszkokat párhuzamosan is végezni. A függvényt az 1. algoritmus mutatja be.

Az algoritmus bemenetét az időhorizont (TH), valamint a batch méret adja. Első lépésként a $profit^{cb}$ értékét inicializálja mínusz végtelennel, mert ennél biztosan nagyobb lesz a profit megoldható probléma esetén. A $SOAA$ halmaz kezdetben nem tartalmaz értéket, később futás során azok a berendezések lesznek benne, amelyek már hozzá vannak rendelve egy adott taszkhoz. A **recipe** függvény ugyanúgy, ahogy a makespan minimalizáló algoritmus esetében van, visszaadja a $G(N, A_1, A_2, w)$ által jelzett probléma receptgráfját, ahol

N : taszkokat és termékeket reprezentáló csomópontok halmaza

A_1 : a receptélek halmaza

A_2 : ütemezési élek halmaza, ebben a pillanatban még üres

$w_{i,i'}$: receptélek súlya, ami az i taszk minimális feldolgozási ideje.

A **select_remove** függvény kiválaszt egy tetszőleges részproblémát. Ezzel egyidejűleg az S -ből kikerül a kiválasztott részprobléma. A kiválasztott részprobléma a PP változóba

kerül a következő formában $(G(N, A_1, A_2, w), I', J', \mathcal{A})$, ahol

$G(N, A_1, A_2, w)$: az ütemezési gráf

I' : a nem ütemezett taszkok halmaza

J' : azon berendezések halmaza, amelyeket lehet még taszkokhoz rendelni

\mathcal{A} : taszk-berendezés hozzárendelések (i, j) párok formájában.

Ezek után az algoritmus megvizsgálja a kiválasztott részproblémát a *Feasible* függvény segítségével. Ez megnézi, hogy a részprobléma a megadott időhorizonton belül megvalósítható-e? Ha igen, akkor megvizsgálja az algoritmus, hogy a részprobléma által nyújtott legnagyobb elérhető jövedelem nagyobb-e, mint az eddig megtalált legjobb megoldás. Ha valamelyik feltételnek nem felel meg a részprobléma, akkor az iteráció ezen lépése véget ér, és egy másik részprobléma kerül kiválasztásra, amennyiben még van ilyen.

Ha mindkét feltételnek megfelel a részprobléma, akkor megnézi az algoritmus, hogy levél-e. Ez azt jelenti, hogy található-e még olyan berendezés, amelyet lehet taszkhoz rendelni. Abban ez esetben ha nincs ilyen berendezés ($J' == \emptyset$), azaz a probléma levélnek minősül, akkor a jelenlegi legjobb megoldás (*profit^{cb}*) értéke felülíródik a vizsgált részprobléma által nyújtott megoldással. Ha viszont nem levél, akkor egy berendezés kerül kiválasztásra a még elérhető berendezések halmazából. A kiválasztott j berendezéshez az algoritmus hozzárendeli az összes olyan lehetséges taszkot, ami még nem volt korábban hozzárendelve. Minden ilyen taszkhoz készül egy másolat a jelenlegi S -gráfról, ami kiegészül az új hozzárendelésekkel.

Azon taszkok esetében, amelyeket még egy berendezés sem végez, viszont a kiválasztott j berendezésen kívül más berendezés is meg tud oldani, olyan döntés is születhet, hogy az adott berendezés nem is fogja azt elvégezni. Ilyenkor az S halmaz kibővül egy olyan részproblémával, ahol a j berendezés már nem végez több taszkot.

Az ütemezés elvégeztével az algoritmus visszatér a megtalált legjobb megoldással, vagyis az elérhető legnagyobb bevétel értékével.

Az algoritmus változóinak elnevezése a következő:

- *profit^{cb}*: a megtalált legjobb megoldás
- *SOAA* (Set Of Already Assigned): azon taszkok halmaza, amelyek már hozzá vannak rendelve az adott berendezéshez
- *S*: a nyitott részproblémák halmaza
- *PP*: az aktuális részprobléma
- *I*: a taszkok halmaza
- *J*: a berendezések halmaza
- *TH*: az időhorizont
- *A*: az élek halmaz
- *w*: a receptél súlya
- *profit_bound*: a kiválasztott részprobléma profit korlátja.

Az algoritmusban meghívott függvények:

- *recipe*: egy receptgráfot ad vissza
- *select_remove*: kiválaszt egy részproblémát valamilyen módszer alapján
- *Feasible*: megmutatja, hogy a részprobléma a megadott időhorizonton belül megoldható-e
- *IsLeaf*: megmutatja, hogy a részprobléma levélnek minősül-e ($J' == \emptyset$).

Algoritmus 1 Párhuzamos taszkvégrehajtást megvalósító algoritmus

```

1: procedure MAXPROFIT( $TH, batch\_number$ )
2:    $profit^{cb} := -\infty$ 
3:    $SOAA := \emptyset$ 
4:    $S := (recipe(), I, J, \emptyset)$ 
5:   while  $S \neq \emptyset$  do
6:      $PP := select\_remove(S)$ 
7:     if  $PP.Feasible(TH)$  then
8:       if  $PP.profit\_bound > profit^{cb}$  then
9:         if  $PP.IsLeaf()$  then
10:           $profit^{cb} := PP.profit\_bound$ 
11:        else
12:           $j := select(J')$ 
13:          for all  $i \in I_j \setminus SOAA$  do
14:             $SOAA_j := SOAA_j \cup i$ 
15:             $G^i(N, A_1^i, A_2^i, w^i) := G(N, A_1, A_2, w)$ 
16:            for all  $i' \in \bigcup_{(i',j) \in \mathcal{A}} I_{i'}^+ \setminus \{i\}$  do
17:               $A_2^i := A_2^i \cup \{(i', i)\}$ 
18:            end for
19:            for all  $i' \in I_i^+$  do
20:               $w_{i,i'}^i := t_{i,j}^{pr}$ 
21:            end for
22:             $S := S \cup (G^i(N, A_1, A_2^i, w^i), I, J', \mathcal{A} \cup \{(i, j)\})$ 
23:          end for
24:          if  $I_j \setminus \bigcup_{j \in J} SOAA_j \subseteq \bigcup_{j \neq j', j' \in J'} I_{j'}$  then
25:             $S := S \cup (G(N, A_1, A_2), I, J' \setminus \{j\}, \mathcal{A})$ 
26:          end if
27:        end if
28:      end if
29:    end while
30:  return  $profit^{cb}$ 
31: end procedure

```

5. fejezet

Implementálás

5.1. S-gráf solver

Az S-gráf megoldó szoftver egy a Pannon Egyetem, Műszaki Informatikai Kar, Rendszer- és Számítástudományi Tanszék által fejlesztett szoftver. C++ nyelven íródott, amely képes nagy teljesítményre, ami fontos a tudományos területeken. A szoftverben a C++ nyelv sajátosságai fedezhetőek fel, többek között az objektum orientált paradigma, valamint különböző, a nyelvbe nem beépített tárolók és algoritmusok.

A szoftver szakaszos üzemű termelőrendszerek rövidtávú ütemezésével foglalkozik. A megoldó jelenleg a tárolási stratégiákat tekintve a NIS, UIS, UW és LW feladatokat támogatja. Ezek mellett lehetőség van AWS feladatok megoldására is. A célfüggvények közül a makespan minimalizáció, a throughput maximalizáció és a ciklusidő minimalizálás támogatott.

A szoftver felépítésében nagy szerepe van az objektum orientáltságnak az osztályok használatán keresztül. Ezek segítségével a megoldóban el vannak különítve a beolvasás, a végeredmény kiírás, valamint a különböző megoldó algoritmusokat végző részek, modulok. A program képes különböző formátumú fájlok beolvasására (Pl: xml, ods, csv), amelyek tartalmazzák a probléma megoldásához szükséges információkat. A bemeneti fájl alapján felépül a receptgráf, és ebből legenerálja a részproblémákat. A szoftver az eredmény képernyőn való megjelenítésén kívül fájlban is eltárolja azt, továbbá a Gantt diagram adatait karakteres formában is elmenti az említett fájlban, illetve lehetőség van arra is,

hogyan ezt a diagramot képfájlban mentse el. A megoldó használata környezeti változók segítségével történik. Ezek segítségével adható meg a bemeneti fájl, az eredményeket tároló fájl, a kívánt megoldó módszer meghatározása, az időhorizont megadása, továbbá számos különböző beállítási lehetőség. Erre egy példa:

$$-i \text{ input.ods} -o \text{ output.txt} -t 2 -m \text{ eqbased}$$

Az "-i" paranccsal adható meg a bemeneti, input fájl, az "-o" paranccsal pedig a kimeneti, output fájlt lehet megadni. A "-t" utasítás a maximálisan használható szálak megadására szolgál. A példában az utolsó paranccsal, az "-m" kapcsolóval, pedig a megoldó módszert tudjuk kiválasztani.

A megoldóban egyik legfontosabb szerepet tölti be a Branch and Bound, azaz a Korlátozás és Szétválasztás algoritmus. A döntések az ütemezés során azt reprezentálják, hogy melyik berendezés, melyik részfeladatot, taszkat végzi el, illetve ezek sorrendjét is megmutatják. A szétválasztás több módszerrel is végrehajtható, ezért a szoftver kialakítása révén létrehozhatóak, hozzáadhatóak új algoritmusok a megoldóhoz.

5.2. Adatok beolvasása

5.2.1. Bemeneti fájl

A program működéséhez szükséges adatokat ods kiterjesztésű fájlban lehet megadni. A solver mappa input almappájában megtalálható az **extended_precedential.ods** fájl, amely segítségül szolgál ahhoz, ha új fájlt kívánunk létrehozni a saját feladatunkhoz tartozó adatokkal. Ez a fájl egy, a szoftver működtetéséhez alkalmas, korábban létrehozott fájl kibővített változata. Az abban megtalálható táblázatokhoz további oszlopok kerültek hozzáadásra, amelyben az új módszerhez szükséges adatok szerepelnek. Az új fájl a következő táblákat tartalmazza, jelezve az újonnan hozzáadott oszlopokat:

- Product tábla tartalmazza a termékekkel kapcsolatos adatokat. Itt a változtatás revenue oszlop hozzáadása, amely az adott termék elkészítésével szerzett jövedelem.

- Equipment táblában találhatóak a berendezésekhez kapcsolódó információk. Újra került hozzáadásra az úgynevezett `b_capacity` oszlop, amely az adott berendezés kapacitását mutatja meg.
- Precedence tábla, amely a gráfban szereplő éleket az él kezdő csomópontjának és végpontjának feltüntetésével szemlélteti. Két új, hasonló oszlop lett a táblához illesztve, ezek a következők:
 - Az `s_percent` oszlop, amely a táblázat `task1` oszlopában szereplő részfeladathoz tartozó százalékot mutatja.
 - A `d_percent` oszlop, amely a táblázat `task2` oszlopában szereplő részfeladathoz tartozó százalékot mutatja.
- A részfeladatok adatait tartalmazó `task` tábla változatlanul került felhasználásra.
- A Proctime táblában találhatóak meg azok az adatok, hogy melyik taszkot melyik berendezés tudja elvégezni, valamint, hogy mennyi idő szükséges ehhez. Ez szintén módosítás nélkül lett átemelve.

5.2.2. Beolvasó függvény

Az új módszer megoldásához szükséges adatok beolvasása, hasonlóan a fájl létrejöttéhez, már egy meglévő függvény kibővítésével valósul meg. Az értékek beolvasásáért a **RelationalProblemReader** osztály a felelős. Ennek feladata, hogy felépítse a receptgráfot, illetve ezt eljuttassa a **MainSolver** osztályhoz. A beolvasást végző függvények forráskódjai az `src\lib` mappában megtalálható **relationalproblemreader.cpp** és **relationalproblemreader.h** fájlokban szerepelnek. Az ebben megtalálható függvények közül az adatok programba történő átemeléséhez a **ReadPrecedential()** függvényre van szükség, amely ki lett bővítve azzal, hogy az új adatokat is képes legyen feldolgozni.

Az említett függvényben meghívásra kerül a **ParseEquipments(SGraph* graph)** eljárás, ami a fejlesztés során ki lett egészítve azzal, hogy vizsgálja meg, hogy a fájlban lévő equipment tábla rendelkezik-e `b_capacity` nevű oszloppal. Ha igen, akkor ellenőrzi, hogy a beolvasott érték negatív vagy sem. Abban az esetben, ha negatív, akkor a szoftver

dob egy kivételt és a működés leáll, mivel csak nem negatív értékekkel oldható meg a probléma. Ellenkező esetben pedig az **SGraph** objektum **Equipment** objektumában, amely ki lett bővítve egy `double` típusú változóval az új adatok megőrzésének érdekében, eltárolásra kerül a beolvasott adat.

Következő változtatás az, hogy a fájlban megtalálható precedence tábla két új oszlopában (`s_percent`, `d_percent`) található értékeket el tudja a szoftver tárolni. Ezek az értékek az **SGraph** objektum **Recipe** objektumában tárolódnak. A tárolást úgy lehet elképzelni, mint egy mátrixot, ami azt mutatja meg, hogy az adott taszkból, melyik taszkba mutat él. A mátrixok mérete $N \times N$ -es, ahol az N a taszkok számát jelenti. A **sourcePercents** azt testesíti meg, hogy annak a taszknak, amelyből az él indul, mekkora kapacitása megy az adott élen. A **demandPercents** pedig azt reprezentálja, hogy mekkora százalékot tud felvenni az a taszk, amelybe az él mutat.

5.3. FlexBatchSchProblem osztály

Ezen osztály feladata a branching, vagyis a szétválasztás elvégzése az ütemezés során. Megállapítja, hogy melyik taszkokhoz melyik berendezés vagy berendezések hozzárendelése szükséges. Másképpen fogalmazva azt kell meghatároznia, hogy melyik berendezésnek, melyik taszkokat kell elvégezni a lehető legnagyobb profit elérésének érdekében. Az osztály forráskódja megtalálható az `src\solver` mappában a **flexbatchschproblem.cpp** és a **flexbatchschproblem.cpp** fájlokban. Ez az osztály egy származtatott osztály. A szülőosztálya az **EqBasedSchProblem** osztály, aminek szintén van egy őosztálya az **SchProblem** osztály. Az új módszer lényege abban áll, hogy egy adott taszkhoz több berendezést is hozzá lehet rendelni, ezért az **EqBasedSchProblem** osztályban megtalálható **Branching** függvény az ott szereplő formában ehhez a megoldó módszerhez nem megfelelő. Az eddigi adattagok mellett, az átdolgozott kiválasztás módszer miatt, szükséges új adattagok bevezetése. Az első új adattag egy vectoron belüli vector segítségével megvalósított mátrix, amely azt reprezentálja, hogy melyik berendezéshez melyik taszk lett már hozzárendelve. A másik új adattag pedig egy **IndexSet** típusú változó, amelyben azok a berendezések szerepelnek, amelyek még nincsenek ütemezve, azaz még képes

elvégezni taszkokat.

5.1. Kódrészlet. FlexBatchSchProblem osztály adattagjai

```
1 class FlexBatchSchProblem: public EqBasedSchProblem{
2     protected:
3         vector<vector<bool>> eqAssignedToTask;
4         IndexSet sounEqs;
5 }
```

5.3.1. MakeDecisions függvény

Ennek a függvénynek a feladata az, hogy találjon egy berendezést, amelyhez a probléma során még lehet legalább egy taszkot rendelni. Ha már nincs olyan berendezés amely még nem ütemezett a részproblémában, akkor a függvény futása máris véget ér. Ha ez nem történik meg, akkor következik a berendezés keresése. Itt meg kell vizsgálni, hogy az éppen soron lévő berendezés szerepel-e azon berendezések halmazában, amelyeket még a részproblémák megoldásához igénybe lehet venni. A berendezések közti keresés addig tart, amíg nem talál egy olyat, amit legalább egy taszkhoz hozzá lehet rendelni. Ezt követően a probléma **Decision** típusú adattagjában ez a berendezés, illetve azok a taszkok amelyeket el tud végezni, kerülnek eltárolásra. Továbbá a függvényben kerül sor arra, hogy az említett adattagba beállítódjanak azok a taszkok, amelyeket csak az éppen kiválasztott berendezés képes elvégezni, valamint azok, amelyeket más berendezéshez vagy berendezésekhez is hozzá lehet rendelni. A döntést tartalmazó adattagban tárolásra kerül ezeken felül még az is, hogy az adott részproblémának mennyi gyereke lehet. Abban az esetben, ha olyan berendezés kerül kiválasztásra, amelyet csak olyan taszkokhoz lehet rendelni, amelyeket más berendezés is képes végrehajtani, akkor meg kell növelni a gyerekek számát, mert lehetséges olyan döntést hozni, hogy az adott berendezést semelyik lehetséges taszkhoz sem rendeljük hozzá.

5.3.2. Branching függvény

Ez a függvény valósítja meg a szétválasztást a probléma megoldása során azaz, minden éppen aktuális részproblémára meghívja a Branch and Bound módszert megvalósító függvényt. Amennyiben az előző pontban már említett, **Decision** típusú adattagja nem üres, akkor lehetséges további döntéseket, hozzárendeléseket végezni. Az említett adattagban szerepel, hogy jelenleg melyik berendezésről kell dönteni, illetve szerepelnek azok a taszkok, amelyeket el tud végezni. Ezek közül a sorban az elsőt kiválasztja és megpróbálja az ütemezést végre hajtani az őosztályban szereplő **Schedule** függvény meghívásával. Ha ez nem lehetséges, akkor nem felelt meg a feasible, megvalósíthatósági tesztnek. Ellenkező esetben az említett függvény hozzáadja a gráfhoz az ütemezési éleket, beállítja a hozzárendeléseket (az elvégzéshez szükséges időt), illetve újraszámolja a frissített ütemezési gráfhoz tartozó ProfitBoundot, a profit korlátot. Ezek után az osztály **eqAssignedToTask** adattagjában beállítja az imént a gráfban is beállított berendezés-taszk párost, hogy ezt később már ne lehessen újra egymáshoz rendelni. Ha mindezt követően a kiválasztott berendezést már csak egy taszkhoz lehet hozzárendelni, akkor a berendezést kivesszük a nem ütemezett berendezések halmazából. Abban az esetben, ha a kiválasztott berendezést már nem kívánjuk hozzárendelni taszkhoz, de van olyan taszk amit még el tudna végezni és ezt a taszkot más berendezés is el tudná végezni, akkor a berendezést kivesszük az ezt követő részproblémákból. Mindezen lépések után a **MakeDecisions** függvény segítségével ennek a részproblémának a gyerek problémájához hozunk döntést, valamint a korlátja is beállításra kerül.

5.3.3. További metódusok

Az **IsFeasible** függvénynek az a feladata, hogy elvégezze annak ellenőrzését, hogy az adott probléma megvalósítható vagy sem. Ehhez igénybe veszi az őosztályban megtalálható ugyanezzel a névvel rendelkező függvényt. Ebben megvizsgálásra kerül, hogy a gráfban található-e kör. A kör olyan egymáshoz csatlakozó élek sorozata, amelyben az élek és pontok egynél többször nem szerepelhetnek, és a kiindulási pont megegyezik a végponttal. Az új osztályban szereplő függvény ezt kibővíti azzal, hogy megvizsgálja, hogy a megadott

időhorizonton belül megoldható-e a feladat. Ha e kettő feltétel közül valamelyiknek nem felel az adott feladat, akkor az éppen vizsgált részprobléma nem lesz megvalósítható a megadott feltételek mellett.

A **Bound** eljárás a korlátot állítja be. Mivel az elkészített módszer maximalizációra lett tervezve, a Solver keretrendszerben megtalálható további megoldó módszerekkel szemben, amelyek pedig minimalizálnak, ezért szükséges a negatív szorzó, hogy a korábban elkészített függvényekben megfelelő eredményeket lehessen elérni.

Megtalálható még egy egyszerű **IsComplete** névvel fellelhető függvény, amelynek csupán annyi a szerepe, hogy egy bool értéket ad vissza, ami azt mutatja meg, hogy a berendezések halmaza üres vagy nem. Az üres állapot azt jelenti, hogy az összes berendezés már ütemezett, vagyis nem szándékozunk, vagy nem lehet hozzá taszkokat rendelni. Ellenkező esetben pedig, legalább egyhez még lehet taszkot hozzárendelni.

Az osztályhoz tartozik három másoló függvény is a **FastClone**, a **Clone** és a **MakeCopy**. Az elsőnek említett függvény egyszerűen létrehoz egy új objektumot, aminek paraméterlistájában átadjuk a másolni szándékozott problémát. A Clone függvény az előbb említetthez képest abban tér el, hogy paraméterként true-t ad meg, ami azt mutatja meg, hogy a receptet is másolja vagy sem. A harmadik viszont meghív egy **CopyInto** névvel ellátott függvényt, ami adattagonként végzi a másolást. Ennél meg lehet adni, hogy teljes másolást végezzen, illetve megtartsa az eredeti problémában lévő döntéseket. További eltérés a három függvény között, hogy a **FastClone** elérhetősége proceted, ami azt jelenti, hogy csak a származtatott osztályai érik él, nem pedig bármely függvény. A másik két függvény viszont public, így azokat máshonnan, osztályon, származtatott osztályokon kívülről is el lehet érni.

5.4. SGraph osztály

Az **SGraph** osztály egy olyan osztály, amely támogatja különböző műveletek elvégzését az S-gráfon. Többek között az ilyen feladatok közé tartozik az ütemezési élek hozzáadása, korlátok lekérdezése, leghosszabb út lekérdezése, valamint taszkok és berendezések közötti hozzárendelések megszüntetése. Az osztályban metódusok módosítására, valamint új

függvények hozzáadására van szükség ahhoz, hogy képes legyen párhuzamos hozzárendelést megengedő feladatok elvégzésére. Két teljesen új függvény került hozzáadásra az **UpdateProfitBound** és az **UpdateProfitBoundFromTask**. Ezenkívül egy függvény nagyobb megváltoztatására is sor került, ez a függvény pedig a **MakeMultipleBatches**. Az előbb említett 3 metódus mindegyike az **sgraph.cpp** és **sgraph.h** fájlokban található meg. Ezek a fájlok az **src\solver** mappában fellelhetők. Az osztályt egy adattaggal kellett kibővíteni, amiben a taszkokhoz tartozó kapacitást lehet eltárolni, vagyis mekkora mennyiséget tud az adott taszk előállítani. Az adattag vector segítségével valósítja meg a tárolást, amelyben double típusú adatokat lehet elmenteni.

5.4.1. MakeMultipleBatches függvény

Ez a függvény abban az esetben játszik fontos szerepet, amikor legalább egy termékből egynél több darabot szeretnénk gyártani, vagyis a batch szám nagyobb lesz mint egy. Ilyenkor az adott termékhez tartozó minden taszk számát a program futása során annyira kell módosítani, amennyi terméket kell legyártani. Tekinthetünk úgy rá, hogy minden darab termékhez saját recept készül. A beolvasás eredetileg egy receptet készít el, vagyis minden taszkból csak egy szerepel. Ezen taszkok új száma alapján módosul már az 5.2.2. pontban említett **Recipe** osztályban lévő $N \times N$ -es mátrixok mérete. A függvény a korábban meglévő módszerekhez szükséges adatok átdolgozásáról gondoskodik, csak az új adattagok módosításával kell foglalkozni, így a taszkok száma már megfelelő lesz, mikor a százalékokat tartalmazó mátrixot módosítani kell. Ezek a százalékok azt jelentik, hogy az él mekkora mennyiségekkel foglalkozik. A bemeneti fájlban megtalálható **s_percent** oszlopban lévő adat azt mutatja meg, hogy az él, abból a taszkból, amelyből indul, onnan az ott gyártott mennyiség mekkora részét képes átvenni. A **d_percent** oszlopban lévő adatok pedig, hogy az a taszk, amelybe az él befut, mekkora százalékát képes felvenni a mennyiségnek.

Az eredetileg szereplő taszkok azonosítója megváltozik, mivel az új taszkokat nem csak hozzá adjuk azokhoz a következő azonosítóval. Az ugyanolyan taszkok egymást követő azonosítót kapnak, így a százalékokat tároló mátrixot is módosítani kell. Fontos dolog az, hogy csak az adott recepthez tartozó taszkok között lehet élt behúzni, nem lehet másik

receptben szereplő taszkhoz hozzárendelni. Ezeket különböző feltételek bevonásával lehet megvalósítani. A megvalósítás úgy jött létre, hogy a mátrix első sorának ellenőrzése kis mértékben eltér a további sorok átvizsgálásától. Ez az eltérés az `over` változóban mutatkozik meg, mégpedig úgy, hogy ez a változó ugyanazokat a taszkokat reprezentáló, különböző azonosítókat vizsgálja a feljebb lévő sorokban. A feltételek forráskódjai a következő részben tekinthetők meg.

5.2. Kódrészlet. Taszkokhoz tartozó százalékok mátrixának növelése

```

1  if(return_graph->IsProfitMaximization()){
2      vector<vector<double>>
          newSourcePercents(return_graph->GetRecipe()->GetTaskCount(),
          vector<double>(return_graph->GetRecipe()->GetTaskCount(),0));
3      vector<vector<double>>
          newDemandPercents(return_graph->GetRecipe()->GetTaskCount(),
          vector<double>(return_graph->GetRecipe()->GetTaskCount(),0));
4      bool wasAlreadyP = false;
5      bool over = false;
6      for(uint i = 0; i<return_graph->GetRecipe()->GetTaskCount(); i++){
7          for(uint j = 0; j<return_graph->GetRecipe()->GetTaskCount(); j++){
8              if(i==0){
9                  if(j>0 && tasksOldIds[j]!=tasksOldIds[j-1]){
10                     wasAlreadyP = false;
11                 }
12                 if(j>0 && tasksOldIds[j]==tasksOldIds[j-1] &&
GetRecipe()->getSourcePercent(tasksOldIds[i],tasksOldIds[j])!=-1 &&
!wasAlreadyP){
13                     wasAlreadyP = true;
14                 }
15                 if(!wasAlreadyP){
16                     newSourcePercents[i][j] =
GetRecipe()->getSourcePercent(tasksOldIds[i],tasksOldIds[j]);
17                     newDemandPercents[j][i] =
GetRecipe()->getDemandPercent(tasksOldIds[j],tasksOldIds[i]);
18                 }
19                 else{
20                     newSourcePercents[i][j] = -1;
21                     newDemandPercents[j][i] = -1;

```



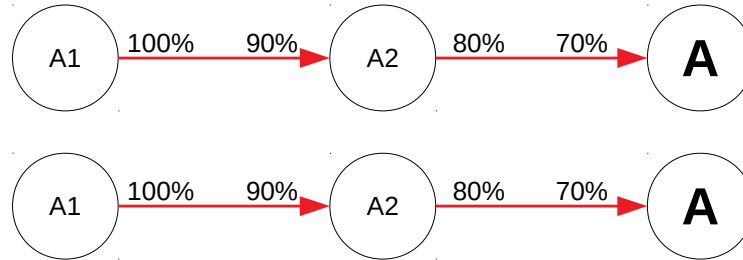
```

22     }
23 }
24 else{
25     over = false;
26     if(j>0 && tasksOldIds[j]!=tasksOldIds[j-1]){
27         wasAlreadyP = false;
28     }
29     if(j>0 && tasksOldIds[j]==tasksOldIds[j-1] &&
GetRecipe()->getSourcePercent(tasksOldIds[i],tasksOldIds[j])!=-1 &&
!wasAlreadyP &&newSourcePercents[i][j-1]!=-1){
30         wasAlreadyP = true;
31     }
32     for(uint k = 1; k<=i;k++){
33         if(tasksOldIds[i]==tasksOldIds[i-k] && newSourcePercents[i-k][j]!=-1
){
34             over =true;
35         }
36     }
37     if(!wasAlreadyP && !over){
38         newSourcePercents[i][j] =
GetRecipe()->getSourcePercent(tasksOldIds[i],tasksOldIds[j]);
39         newDemandPercents[j][i] =
GetRecipe()->getDemandPercent(tasksOldIds[j],tasksOldIds[i]);
40     }
41     else {
42         newSourcePercents[i][j] = -1;
43         newDemandPercents[j][i] = -1;
44     }
45 }
46 }
47 }
48 return_graph->GetRecipe()->SetSourcePercents(newSourcePercents);
49 return_graph->GetRecipe()->SetDemandPercents(newDemandPercents);
50 }

```

A könnyebb átláthatóság érdekében az 5.1 ábrán látható egy példa. Két darab A terméket akarunk legyártani. Az adatok fájlból való beolvasása során az A1-es taszk megkapja a 0. azonosítót, az A2 pedig az 1. sorszámot. Mivel kettőt gyártunk le,

ezért meghívódik a **MakeMultipleBatches** függvény, és újra kiosztja az azonosítókat, miközben létrehozta kellő számban az eredetiről lemásolt taszkokat.



5.1. ábra. Példafeladat

Az új sorrend a 5.1 táblázatban látható. Zárójelben pedig látható, hogy az 5.1 ábrán melyik sorban lévő recepthoz tartozik.

5.1. táblázat. A taszkokhoz tartozó azonosítók

Taszk	Azonosító
A1 (első)	0
A1 (második)	1
A2 (első)	2
A2 (második)	3

Azt nem lehet megengedni, hogy a 0. azonosítóval rendelkező taszk és a 3. azonosítóval rendelkező taszk között él keletkezzen, mert nem ez a kettő taszk tartozik egymáshoz. A példafeladatban látható, hogy egy él kezdő taszkjának, és annak a taszknak, amelybe érkezik, az azonosítójuk különbsége éppen annyi, amennyi terméket gyártani szeretnénk. Jelen esetben kettő.

5.4.2. UpdateProfitBound függvény

A függvény feladata, hogy kiszámolja az első S-gráfhoz tartozó korlátot, valamint minden egyes taszkhoz tartozó kapacitást is meghatározza. Legelső lépésben beállítja a taszkoknak

az úgynevezett alap kapacitását. Ezt az alapján lehet meghatározni, hogy egyes berendezések, melyek a részfeladatot képesek elvégezni rendelkeznek-e kapacitással. Ezeket a bemeneti fájlból olvassa be a szoftver. Egy taszk kapacitását az összes, őt elvégezni képes taszk kapacitásának összege adja meg. Miután ez megtörtént a következő lépés a kezdő csomópontok, taszkok megkeresése. Ez 2 *for* ciklus segítségével történik, amelyekben megvizsgáljuk, hogy az adott csomópont rendelkezik-e abba tartó, bementi éllel. Ha ilyen nincs akkor biztosak lehetünk benne, hogy az adott csomópont kezdő csomópont. Miután ezzel megvagyunk akkor megkeressük az előbb megtalált csomópontok szomszédjait. Ehhez egy **deque** (double-ended queue), azaz kétvégű sort veszünk igénybe. Ennek előnye abban rejlik, hogy mind az elejéhez, mind a végéhez lehetséges elemet fűzni, illetve onnan eltávolítani. Ebbe a változóba tároljuk a kezdő csomópontok szomszédjait. Ismét két *for* ciklus segítségével bejárjuk a taszkokat, amennyiben van köztük él, és még nem szerepel az adott taszk a **deque-ban**, akkor beletesszük.

Mindezeket követően elérkezik az a rész, ahol a kapacitások felülvizsgálata következik. Egy *while* ciklus segítségével minden **deque-ban** szereplő elemet vizsgálunk addig, amíg az teljesen üressé nem válik. Először a **deque** első elemét kivesszük belőle, majd egy *for* ciklus segítségével ismét végighaladunk a taszkokon. Ha az éppen ciklusban lévő taszkból mutat él a **deque-ból** kivett taszkba, továbbá a taszknak, amiből az él indult, már korábban, a mostani függvény futása során felül lett vizsgálva a kapacitása, akkor lehet ellenőrizni a **deque-ból** kivett taszk kapacitását. Ha az aktuálisan kiszámolt kapacitás nagyobb mint az eddigi, akkor a korábbi helyett az újat jelöljük ki a taszk kapacitásának. Ennek kiszámításhoz a következő képletet kell használni.

$$\text{kapacitás} = \text{előző taszk kapacitása} * \frac{\text{előző taszkból felvett kapacitás mennyiségnek százaléka}}{\text{a mennyiség százaléka, amit az éppen vizsgált taszk feltud venni}}$$

Abban az esetben, ha a kezdeti taszk még nem lett ellenőrizve, akkor nem lehet megvizsgálni az éppen kiválasztott taszkot, ezért visszatesszük a **deque** végére. Ha viszont lehetséges volt és végbe is ment az adott taszk felülvizsgálata, akkor megkeressük ennek a csomópontnak a szomszédjait és hozzáfűzzük a **deque** végéhez.

A függvény utolsó szakaszában történik meg a profit korlát meghatározása, kiszámolása.

A korlátot azoknak a taszkoknak a kapacitása adja meg, amelyek a termékek előtti utolsó részfeladatok. Ezek megtalálása úgy történik, hogy *for* ciklus segítségével bejárjuk a termékeket, valamit a taszkokat is. Ha valamelyik taszkból indul el egy termékbe, akkor a taszk kapacitását megszorozzuk a termékből származó jövedelemmel.

5.4.3. UpdateProfitBoundFromTask függvény

Ez a függvény feladatában hasonlít az előző pontban bemutatott **UpdateProfitBound** metódushoz. A taszkokhoz tartozó kapacitást, valamint a korlátot kell meghatározni. Különbséget abban lehet felfedezni, hogy ennek a függvénynek nem kell a teljes S-gráfot bejárnia, az összes kapacitást nem szükséges újraszámolnia, hanem csak a paraméterben megadott taszkokhoz, és az ezt követő taszkokhoz tartozó kapacitásokat kell újraszámolnia. Az ezt követő taszkokat úgy kell értelmezni, hogy a megadott taszk szomszédjait, valamint azoknak a szomszédjait (így tovább egészen addig, amíg létezik egy szomszéd taszk) kell átvizsgálni és szükség esetén megváltoztatni, módosítani a kapacitásukat.

Az előző pontban bemutatott függvénytől eltérően nem az S-gráf bemeneti node-jait, csomópontjait reprezentáló taszkokat kell először megkeresni, hanem a paraméterlistában átadottat, valamint annak közvetlen szomszédjait. Ehhez is a **deque-t** veszünk igénybe. Legelsőnek az átadott taszk kerül bele, majd *for* ciklus segítségével megkeresi annak szomszédjait, és ezeket is a **deque** végéhez hozzáfűzi. Ezek után meg kell keresni a többi olyan taszkot is, amelyeknek a kapacitását újra át kell vizsgálni, és ha szükséges módosítást végezni. Azt követően, hogy a két végű sor tartalmazza az összes átvizsgálandó taszkot megtörténik a tényleges kapacitásmódosítás. Itt *while* ciklus felhasználásával addig történik az ellenőrzés, amíg teljesen üressé válik a **deque**. Ebből kivételre kerül a legelső elem, és megvizsgáljuk, hogy van-e ebbe tartó él, vagyis az S-gráf kezdő csomópontja vagy sem. Későbbiekben lesz szerepe ennek. Az éppen vizsgált taszk kapacitását átállítjuk nullára, majd a még hozzárendelhető berendezések kapacitásának összegét megkapja, mint új értéket. Amennyiben a taszknak nincs bejövő éle, akkor az imént meghatározott kapacitása megmarad, nincs szükség további ellenőrzésekre. Ellenben, ha van bemenő él, akkor még további feltételekre meg kell vizsgálni. Ha az a taszk, amelyből az él érkezik még nem ellenőrzött, akkor nem lehetséges a mostani taszk kapacitásának pontos meghatározása

sem, ezért visszakerül a *deque* végére. Azonban ha ellenőrzött a vizsgált taszkot megelőző részfeladat, akkor az előző pontban feltüntetett képlet szerint ki kell számolni a kapacitást. Ha ez nagyobb, mint a beállított, akkor ezt kapja meg a taszk új értéként. Ellenkező esetben pedig marad a már meglévő érték. Ezeket követően szükséges még egy *for* ciklus segítségével végigmenni a taszkokon, annak érdekében, hogy ha létezik megtalálja az összes szomszédját az imént vizsgált taszknak. Ha talált ennek megfelelő taszkot akkor a *deque* végéhez hozzáadjuk.

Utolsó lépés a függvényben a profit korlát kiszámítása. Ez teljes mértékben megegyezik az előző pontban szereplő függvény befejező lépésével. Az S-gráfon a termék előtt szereplő utolsó részfeladat kapacitása szükséges a korlát kiszámításához. Azért, hogy megtaláljuk ezt a taszkot szükség van arra, hogy két darab *for* ciklus bejárja a termékeket és a taszkokat. Ha megtalálta akkor annak kapacitása és a terméken szerzett jövedelem szorzata megadja a korlátot.

5.4.4. Egyéb új metódusok

Az **IsProfitMaximization** függvény megadja, hogy a megoldó szoftver indításakor az új módszer került meghívásra parancssori paraméterek által. Olyan esetekben kerül meghívásra, amelyeket csak abban az esetben kell végrehajtani, ha az új – taszkok párhuzamos végrehajtására alkalmas – módszer lett meghívva. Például a futás végén a fájlba írásnál kapacitásokat csak ennél a módszernél akarunk kiírni.

A másik egyszerűbb függvény a **GetTaskCapacity**. Paraméterként egy részfeladat azonosítóját várja, és ez alapján visszaadja az adott taszkhhoz tartozó kapacitást.

5.5. Argumentum hozzáadás

Az új módszer elkészítése miatt szükség volt új argumentumok hozzáadására, amelyeket az **arguments.cpp** fájlban lehet elérni. Ez a fájl az **src\solver** mappában található. Két argumentum került hozzáadásra. Az első *flexbatch*, amely a **method** kapcsolóhoz tartozik, ezzel a megoldó módszert lehet kiválasztani. A második új argumentum a *profit-max*, amely a **obj** kapcsolóhoz tartozik, ez pedig a célfüggvényt reprezentálja.

5.6. Megoldás fájlba írása

Az új módszerrel kapcsolatos kapacitások kezelése eddig nem volt része a solver megoldó szoftvernek. Ez alól a fájlba történő kiírásuk sem kivétel, emiatt szükség volt a már meglévő kiírást elvégző függvény módosítására. A szóban lévő függvény a **WriteText**, amely **SGraph** típusú változót vár paraméterként. A függvény **solutionwriter.cpp** fájlban található míg a deklarációja a **solutionwriter.h** fájlban helyezkedik el. Ezeket a fájlokat a **src\lib** mappában találhatjuk meg.

Az eredetileg meglévő függvény a fájlba két elkülöníthető rész kiírását végezte. Az első az volt, amely megmutatta az éleket. Ebbe beletartozik mind a recept, mind az ütemezési élek csoportja. Ezenfelül még megjelenik itt egy időérték, amely azt mutatja, hogy az adott taszkot, amelyből az él kiindul mennyi idő alatt lehet befejezni, elvégezni. Továbbá a boundot, korlátot is itt írja ki a fájlba a függvény. A második fele pedig az elvégzett feladathoz tartozó Gantt diagramot jeleníti meg karakteres formában. Ez a rész megadja, hogy melyik taszkot, melyik berendezés végezi el és, hogy ez mikor történik.

Az említett két rész közé került az általam elkészített kapacitások kiírására szolgáló rész. Pontosabban, mivel az új módszer kapacitás és jövedelem szorzataként adja meg a korlátot ezért, a rész a kapacitások után jelenik ezentúl meg. Először a taszkok kapacitása kerül kiírásra, ezeket követik a termékek, amelyekhez az utolsó taszk kapacitása és a termékből származó jövedelem adja meg az értéket. A korlát kiszámítása a termékekhez tartozó értékek összeadásával történik.

6. fejezet

Tesztelés

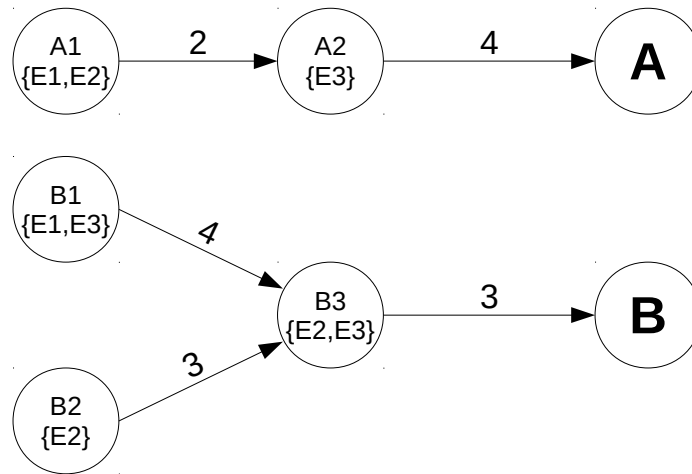
Ebben a fejezetben az elkészített megoldó algoritmus tesztelését mutatom be, hogy az megfelelően, hiba nélkül képes a feladatokat megoldani. A tesztelés a következő konfigurációval rendelkező számítógéppel történt:

- Processzor: Intel i5-7200, 2,50 Ghz
- 8 GB RAM
- Operációs rendszer: Windows 10
- Fejlesztési használt szoftverek:
 - Qt Creator 4.7.1
 - Qt 5.11.2
 - Boost Libraries 1.68.0
 - Microsoft Visual C++ Compiler 15.0

Az S-gráf megoldó szoftvert parancssori paraméterek segítségével lehet működtetni. A különböző megoldó módszereket, amelyek megtalálhatóak a szoftverbe implementálva, más és más kapcsolók segítségével lehet elérni, meghívni. Ezeknek listája megtalálható a **solver** mappában lévő **README.md** fájlban. Az általam megvalósított módszerhez a következő kapcsolókat mindenképpen használni kell, hogy a program hiba nélkül fusson és elvégezze az ütemezést:

- **-i extended_precedential.ods:** A bemeneti fájl elérési útvonalát kell megadni ezzel.
- **-o output.txt:** A kimeneti fájl elérési útvonala. Két fajta kiterjesztésű fájlt lehet megadni: **TXT** és **PNG**. Előbbi esetében a fájlba kerülnek az élek, mind a receptet, mind az ütemezési élek, valamint, hogy mennyi ideig tart a részfeladat befejezése, amelyből ezek kiindulnak. Ezenfelül a Gantt diagram karakteres formában is megjelenik. PNG kiterjesztésű fájl megadása esetén pedig kirajzolásra kerül egy Gantt diagram.
- **-m flexbatch:** Ezzel a kapcsolóval a megoldó módszert lehet kiválasztani. A *flexbatch* határozza meg, hogy az általam megvalósított algoritmus kerüljön meghívásra.
- **-timehor:** Időhorizont megadása történik ezzel a kapcsolóval.
- **-obj profit_max:** A célfüggvény kiválasztása, ebben az esetben az újonnan a megoldó szoftverhez hozzáadott profit maximalizálás kerül kiválasztásra.
- **-precycle off:** A precycle az ütemezés gyorsításra szolgál, mégpedig úgy, hogy előre lefut, és kört keres a gráfban. Az új módszer esetén hibásan működik, nem összeegyeztethető azzal, ezért szükséges a kikapcsolása.
- **-nopresolvers:** Hasonlóan az előzőhöz a presolver is az ütemezést gyorsítja, de nem egyeztethető össze az új megoldó módszerrel, emiatt kell mindenképpen inaktívvá tenni.

A 6.1 ábrán látható mintafeladat alapján kerül bemutatásra a megoldó módszer. Két termékhez tartozó receptet látunk, illetve a részfeladatokat, valamint az ezeket megvalósítani képes berendezéseket. Az éleken megfigyelhető még a taszkok befejezéséhez szükséges idő.



6.1. ábra. Tesztfeladat

6.1. Taszkok közti kapacitások változtatásának hatása

A módszer sajátossága, hogy a receptélekkel az egyes taszkok kapacitásának meghatározott százaléka hasznosítható. Ezeket a százalékokat a bemeneti fájlban lehet megadni. A példafeladat a 6.2 ábrán megtekinthető bemeneti adatokkal rendelkezik. Az időhorizont a bemutatott mintafeladat során 20. Látható, hogy az egyes részfeladat által lehetséges kapacitásoknak nem a teljes mennyisége kerül tovább a következő köztes feladathoz. Az, hogy kisebb mennyiség kerül felhasználásra nagy mértékben befolyásolja a korlátot. Emellett az ütemezés megoldását is befolyásolja, mert emiatt lehetséges, hogy bizonyos berendezések nem végezhetik el az adott taszkot.

Az egyszerűség kedvéért a példában csak 2 darab A terméket és 1 darab B terméket gyártunk le. Mindkét termék legyártásából származó jövedelem mindössze egy egység. A *precendce* táblában látható, hogy a taszkok által elérhető mennyiségek nem 100 százalékban kerülnek további felhasználásra. Például az A1 és A2 taszkok esetében, az A1-es taszk mennyiségének 80 százaléka kerül továbbításra, illetve ennek a már kisebb mennyiségnek a 70 százalékát veszi fel az A2-es részfeladat. A *proctime* táblán megtalálhatjuk, hogy melyik taszkot, melyik berendezés tudja elvégezni, valamint ezt mennyi idő alatt teszi.

product		
name	number	revenue
	1	
A	2	1
B	1	1

task	
name	pr_name
	<product.name>
A1	A
A2	A
B1	B
B2	B
B3	B

equipment		
name	number	b_capacity
	1	
E1	1	40
E2	1	50
E3	1	60

precedence			
task1	task2	s_percent	d_percent
<task.name>	<task.name>		
A1	A2	80	70
B1	B3	50	60
B2	B3	70	65

proctime		
task_name	eq_name	time
<task.name>	equipment.name	infity
A1	E1	2
A1	E2	2
A2	E3	4
B1	E1	4
B1	E3	4
B2	E2	3
B3	E2	3
B3	E3	3

6.2. ábra. Első feladat bemeneti adatai

A feladat megoldását tartalmazó TXT kiterjesztésű fájlt három darab elkülöníthető részre tudjuk felosztani. Az első része látható a 6.3 ábrán. Az ábra elején az éleket találhatjuk meg, mégpedig olyan formában, hogy melyik taszkból melyik taszkba mutat. Továbbá láthatóak időértékek, amelyek megadják, hogy az élt megelőző részfeladatot mennyi idő alatt lehet elvégezni. Ez a rész tartalmazza mind a receptéleket, mind az ütemezési éleket. Úgy tudjuk ezeket elkülöníteni, hogy amelyikhez 0 időérték van rendelve, azok tartoznak az ütemezési élek csoportjához. Mivel az egyik termékből, nevezetesen az A-ból, több mint egy darabot gyártunk ezért megkülönböztetjük az egyes receptekhez tartozó feladatokat. Láthatunk A1-et és A1_2-t. Ugyanolyan típusú feladatról beszélünk, de különböző recepthez tartoznak, ezért kell megkülönböztetni egymástól ezeket.

```

A1 ---> A2  2
A1_2 ---> A2_2  2
A2 ---> A1_2  0
A2 ---> A2_2  0
A2 ---> A  4
A2_2 ---> A_2  4
B1 ---> A2  0
B1 ---> A2_2  0
B1 ---> B3  4
B2 ---> B3  3
B3 ---> A1  0
B3 ---> B  3
A ---> A2_2  0
B ---> A1  0
B ---> A2  0

```

6.3. ábra. A megoldást tartalmazó fájl első része

A második részben a taszkok és a hozzájuk tartozó kapacitások, valamint a termékekhez tartozó kapacitások és a termékek előállításából származó jövedelem szorzata található. Ezeket követően szerepel a bound, a korlát, ami az adott feltételek és adatok mellett 173,846 lett. Ezt úgy kapjuk meg, hogy a termékekhez tartozó értékeket összeadjuk. Jelen példa esetében 3 érték kerül összeadásra, ezek a következők: A2, A2_2, és a B3. Az A2-es és a A2_2-es részfeladatok kapacitása 60, a B3-as taszk kapacitása pedig 53,846. Mivel a példában mindkét termék esetében a jövedelem egy, ezért az érték marad változatlanul a termékeknél. Ezeket összeadva kijön a 173,846, ami megegyezik a szoftver által kiszámolt megoldással. Ezek az értékek a 6.4 ábrán megtekinthetők.

```

A1: 90
A1_2: 90
A2: 60
A2_2: 60
B1: 100
B2: 50
B3: 53.8462
A: 60
A_2: 60
B: 53.8462
bound: 173.846

```

6.4. ábra. A megoldást tartalmazó fájl második része

Az utolsó szakaszban a Gantt diagram karakteres formában található meg. Látható,

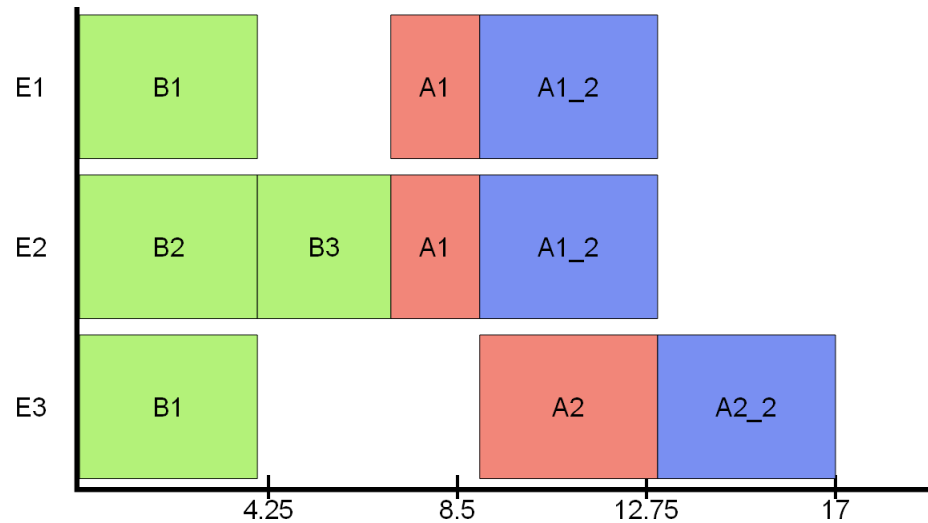
hogyan a megadott bemeneti adatok alapján minden lehetséges taszk és berendezés kombináció elő áll. A6.5 ábrán látható ez.

```
Gantt chart:
A - A1: 7-9, 2  E1  E2
A_2 - A1_2: 9-13, 4 E1  E2
A - A2: 9-13, 4  E3
A_2 - A2_2: 13-17, 4      E3
B - B1: 0-4, 4  E1  E3
B - B2: 0-4, 4  E2
B - B3: 4-7, 3  E2  E3
The longest path: 17
```

6.5. ábra. A megoldást tartalmazó fájl harmadik része

A következő esetben újra lefuttatjuk a példafeladatot, azzal a kis változtatással a bemeneti adatokon, hogy az élekekhez tartozó százalékok mindegyikét felemeljük 100 százalékra, vagyis a teljes mennyiség minden taszk esetében tovább kerül a következő részfeladathoz. A többi adat, köztük a kapcsolóval megadott időhorizont is változatlan marad.

Ahogy várható volt az újbóli futtatás során eltérések vannak az előzőhöz képest. Egyik legfontosabb eltérés, hogy a bound megváltozott, a jelenlegi futás során kerekben 170 lett. További eltérése, hogy most már nem minden lehetséges taszk - berendezés pár lett összerendelve, mert abban az esetben a megadott időhorizonton belül nem lenne megoldható a feladat. A változás a B3-as taszk esetében történt meg. Az E3-as berendezés már nem lett hozzárendelve, így ezt a feladatot nem végzi el. A megoldó szoftver által elkészített png kiterjesztésű fájl látható a 6.6 ábrán. Könnyen leolvasható, hogy a berendezések párhuzamosan képesek ugyanazt a taszkot elvégezni. Erre példa a B1-es köztes feladat rögtön az ütemezés elején.



6.6. ábra. A solver által elkészített Gantt diagram

6.2. Időhorizont változtatás

A parancssori paraméterben megadott időhorizont is fontos szerepet tölt be az ütemezés során. Az eddig bemutatott példáknál ez nem változott meg. Jelenlegi részben viszont az ezen korlátozás módosítására bekövetkező változások bemutatása a cél. Az időhorizont azt az időt adja meg, amelyen belül meg kell oldani a feladatot.

Minden receptnek van egy olyan minimális ideje, amely alatt nem teljesíthető. Ha ennél kisebbet adunk meg, akkor a feladat megoldhatatlan, elvégezhetetlen lesz. A 6.1 ábrán látható feladat esetében, amelyet a 6.2 táblákban szereplő adatokkal futtatunk, ez a mindenképpen szükséges idő 12 egység lesz. Szóval ha 11 vagy annál kisebb időhorizontot adunk meg, akkor nem kapunk megoldást a feladatra. Minden egyes gyártási munkafolyamat során találunk egy felső határt, amelynél hiába biztosunk több időt a munkafolyamat befejezésére, nem lehet nagyobb bevételre szert tenni. A mintafeladatnál ez 17 időegységnél következik be. Ebben az esetben minden berendezés elvégzi azokat a taszkokat, amelyeket el is tud végezni. A példából láthatjuk, hogy minél több idő van a feladat megoldására, annál nagyobb bevételre tehetünk szert. Ennek oka az, hogy több berendezést tudunk beállítani adott feladat elvégzésére, mert már belefér abba az időtartamba, amelyet korlátként megadtunk. Láthatjuk a 15 és 16 időegység esetében, hogy hiába biz-

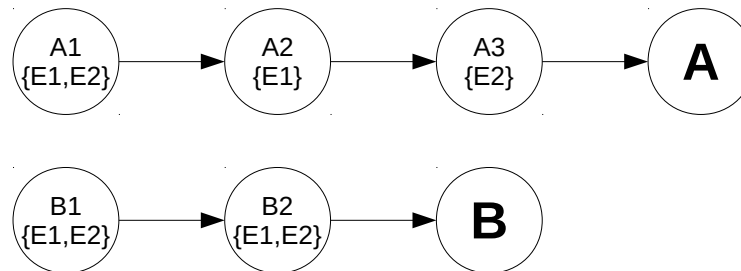
tosítunk nagyobb időhorizontot, nem tudunk nagyobb bevételt elérni. Ilyen eset akkor fordulhat elő, mikor egy részfeladat elvégzéséhez szükséges idő nagyobb, mint amekkora szabadon fennmaradó idővel rendelkezünk még a határ alatt.

6.1. táblázat. Adott időhorizont alatt elérhető bevételek

Időhorizont	≤ 11	12	13	14	15,16	≥ 17
Max bevétel	nem megoldható	139,048	153,333	155,714	159,56	173,846

6.3. Második tesztfeladat

A második tesztfeladat során két fajta terméket kell gyártani. Az A termék előállításához 2 részfeladatot kell elvégezni, a B termék esetében pedig 2 darabot. Ehhez 2 darab berendezés áll rendelkezésre, az E1 és E2 elnevezésű berendezés. A 6.7 ábráról leolvasható, hogy melyik taszkot melyik berendezés képes elvégezni. A1-es taszkot mindkét berendezés, A2-es taszkot csak az E1, A3-as taszkot pedig csak az E2-es berendezés tudja végrehajtani. A másik termék esetében mindkét taszkot mindkét berendezés képes megvalósítani.



6.7. ábra. Második tesztfeladat

Az A.1 táblázatban látható a mintafeladaton elvégzett tesztesetek kiemelt adatainak első része. Továbbiak a függelékben találhatóak meg. A teszteléssel kapcsolatos fájlok a CD melléklet **Teszteles** mappában vannak. Ezen belül a bemeneti adatokat tartalmazó fájlok fellelhetők a **Input_fajlok** mappában. A megoldást megjelenítő Gantt diagram pedig a **Megoldasok** mappában tekinthető meg.

6.2. táblázat. Második példafeladat tesztesetei

Fájl név	Időhorizont	A termék	B termék	Kapacitások	Hozzárendelések	Bevétel	Megoldás ideje	Gantt
teszt01	13	1 db	1 db	A1: 60 A2: 40 A3: 40 B1: 60 B2: 60	E1: A2 E2: A1, A3, B1, B2	700	0,059 sec	er01
teszt02	15	1 db	1 db	A1: 100 A2: 40 A3: 40 B1: 100 B2: 100	E1: A1, A2 B1, B2 E2: A1, A3, B1, B2	900	0,029 sec	er02
teszt03	13	1 db	1 db	A1: 60 A2: 40 A3: 40 B1: 60 B2: 60	E1: A2 E2: A1, A3, B1, B2	700	0,060 sec	er03
teszt04	15	1 db	1 db	A1: 100 A2: 40 A3: 40 B1: 100 B2: 100	E1: A1, A2 B1, B2 E2: A1, A3, B1, B2	900	0,028 sec	er04
teszt05	20	2 db	1 db	A1: 60 A1.2: 100 A2: 40 A2.2: 40 A3: 40 A3.2:40 B1: 60 B2: 60	E1: A1.2, A2, A2.2 E2: A1, A1.2, A3, A3.2, B1, B2	1100	0,084 sec	er05

Első oszlopban a bemeneti adatokat tartalmazó fájl neve szerepel. Ennek kiterjesztése minden esetben *ods*. Másodikban az időhorizont szerepel, amelyet parancssori paraméterben kap meg a megoldó szoftver. Harmadik és negyedik oszlopban az egyik, illetve másik termékből legyártott mennyiség szerepel. Ötödik oszlopban az egyes taszkok kapacitása van. A hatodikban kapnak helyet a taszk és berendezések közötti hozzárendelések. Hetedik oszlopban a termelés során elért bevétel értéke látható. Utolsó előtti oszlopban az az idő szerepel, ameddig a szoftver végezte az ütemezést. Végezetül az utolsó oszlopban a Gantt diagramot tartalmazó fájl neve szerepel, aminek kiterjesztése *png*.

A teszteknel ugyanazon feladat különböző bemeneti adatokkal került tesztelésre. Minden esetben változatlan marad a termékek elkészítéséből származó jövedelem. Ez az A termék esetén 10 egység, B termék esetében pedig 5. A berendezések kapacitása, amely alapján a taszkok kapacitása alakul, szintén állandó marad a tesztesetekben. Az E1-es berendezés kapacitása 40, az E2-es berendezése pedig 60. Ezeken kívül az sem változik, hogy az adott taszkokat mennyi ideig tart elvégezni. Ezek az adatok megtekinthetők a tesztek bementi fájljaiban.

Az első 4 teszt során mindegyik termékből 1 darabot gyártunk. Első esetben 13-nak adtam meg az időhorizontot, így a bevétel 700 lett. A második tesztnél ezt az értéket megnöveltem 15-re, így 900 egységre emelkedett a bevétel. Ez annak köszönhető, hogy az E1-es berendezés az első esetben csak 1 taszk elvégzésért felelős. A második esetben viszont még 3 darab taszkot elvégez a párhuzamosan végezhető munka engedélyezése révén, így ezeknek a taszkoknak a kapacitása megnövekedett és nagyobb mennyiséget állít elő. E két tesztnél a kapacitások 100 százaléka fel van használva. Ebben tér el a harmadik és negyedik teszt. Ott ugyan 50 százalékra van ez csökkentve, de az arány ugyanakkora lesz, így a végső kapacitások, melyekből a jövedelem származik, sem változnak, így maradnak az eddigi elérhető legjobb bevételek. Későbbi teszteseteknél majd előjön, hogy miként változik az ütemezés ennek hatására.

Az ötödik, hatodik, hetedik és nyolcadik tesztesetben 2 darab A termék és 1 darab B termék kerül legyártásra. Az ötödik tesztnél az időhorizont 20 és a kapacitások teljes mennyiségben felhasználásra kerülnek. Így a bevétel 1100 egység lesz. Miután az időhorizontot megemelttem a bevétel megnőtt 200 egységgel, így 1300 lett. Ez abból követ-

kezik, hogy az E1-es berendezés az E2-es berendezéssel egyetemben már az A1, B1, B2-es taszkokat is elvégzi. A hetedik és nyolcadik teszténél észrevehető, hogy lecsökken a bevétel. Ez a korábban említett kapacitások mennyiségének továbbvitelének megváltozásából következik. Az A1-es és A2-es közötti élen lévő arány 2 az 1-hez, míg az A2 és A3 között 1 a 2-höz. Az előző fejezetekben említett képlet, ahol a kapacitást szorozzuk ezzel az aránnyal, adja meg, hogy kevesebb lesz az A3-as taszk kapacitása. Mivel 2 darab A termék kerül legyártásra, így duplán számolódik ez a bevételnél.

Ez számokban kifejezve:

A1 kapacitása 100

A2 kapacitása a következő számításból adódik: $100 * (100/50)$ Ez 200 lesz, de mivel ez nagyobb, mint az berendezésből adódó kapacitás, ezért nem ez fog számítani. Mivel ezt a taszkot az E1-es berendezés végzi el, aminek 40 lesz a kapacitása, így a tényleges kapacitása az A2-es taszknak is 40 lesz.

Az előző számításhoz hasonlóan kapható meg az A3-as taszk kapacitása. A3-as berendezéséből adódó kapacitás szorozva az éleken szállított kapacitás arányával. Számokban ez a következő: $40 * (50/100)$ Ez 20 lesz, ami a legkisebb a korlátok közül, így ezt kapja meg a taszk.

A termékből származó jövedelem 10. 20 egység van 1 darab A termék esetén, ezt megszorozzuk az említett jövedelemmel kijön a 200. 2 darab A terméket gyártunk le, ezért összesen az A gyártásból származó jövedelem 400 lesz.

B termék esetében nem vezetem le, hogyan jön ki az 500-as bevétel, mert megegyezik az A termék esetén bemutatott levezetéssel.

A két fajta termékből származó bevételt összeadva megkapjuk a 900 egységnyi össz-bevételt.

7. fejezet

Összefoglalás

A dolgozatomban a throughput maximalizálás szakaszos üzemű rendszerekben témakörrel foglalkoztam. Először az ütemezéssel kapcsolatos irodalmat tanulmányoztam, amelynek során megismerkedtem az ipari környezetben használt ütemezési megoldó módszerekkel. Ezek közül az S-gráf keretrendszer lett az, amely a dolgozatom alapját képezi. Ezt követően megismerkedtem a a makespan minimalizálás és a throughput maximalizálás algoritmusával. Ezek megismerése adta meg az alapot, hogy elkészülhessen a flexibilis batch mérettel rendelkező feladatok megoldására alkalmas módszertan. Ez egy már meglévő S-gráf keretrendszert megvalósító szoftverbe történő implementálással valósult meg. Az implementáció megvalósítását követően tesztelésnek vetettem alá a bővített rendszert. A tesztelés eredményei bizonyították, hogy megfelelően működik a megoldó módszer, mivel jó eredményeket szolgáltat.

A feladat elvégzését követően a megoldó szoftver már képes flexibilis batch mérettel rendelkező feladatok megoldására, azonban a jövőben további lehetőségek állnak rendelkezésre, hogy a módszer gyorsabban elvégezhesse a feladatát, megtalálja az optimális megoldást a problémára. Ha az eddigi meglévő algoritmus módosításra kerülne úgy, hogy az adott rész nem ad jobb megoldást a meglévónél, de mégis megvizsgáljuk, hogy megoldhatóak-e az ott lévő batchek, akkor változhat és jobb teljesítmény lenne elérhető a módszerrel.

Irodalomjegyzék

- [1] M. Hegyháti, „Batch process scheduling: Extensions of the s-graph framework,” 2015.
- [2] E. Kondili, C. Pantelides, and R. Sargent, „A general algorithm for short-term scheduling of batch operations—i. milp formulation,” *Computers & Chemical Engineering*, vol. 17, no. 2, pp. 211 – 227, 1993. An International Journal of Computer Applications in Chemical Engineering.
- [3] J. L. N. Susarla and I. A. Karimi, „A novel approach to scheduling multipurpose batch plants using unit-slots,” pp. 1859–1879, 2010.
- [4] C. Cassandras and S. Lafortune, „Introduction to discrete event systems,” 2008.
- [5] P. L. M. Ghaeli, P. A. Bahri and T. Gu, „Petri-net based formulation and algorithm for short-term scheduling of batch plants,” pp. 249–259., 2005.
- [6] E. Sanmarti, F. Friedler, and L. Puigjaner, „Combinatorial technique for short term scheduling of multipurpose batch plants based on schedule-graph representation,” *Computers & Chemical Engineering*, vol. 22, pp. S847 – S850, 1998. European Symposium on Computer Aided Process Engineering-8.
- [7] E. Sanmarti, T. Holczinger, L. Puigjaner, and F. Friedler, „Combinatorial framework for effective scheduling of multipurpose batch plants,” *AIChE Journal*, vol. 48, no. 11, pp. 2557–2570, 2002.
- [8] H. L. Gantt, *Work Wages and Profits*. New York, The Engineering magazine co., 1913.

- [9] H. L. Gantt, *Organizing for work*. New York : Harcourt, Brace and Howe, 1919.
- [10] T. Majozi and F. Friedler, „Maximization of throughput in a multipurpose batch plant under a fixed time horizon: S-graph approach,” *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 45, no. 20, pp. 6713–6720, 2006.
- [11] T. Holczinger, T. Majozi, M. Hegyhati, and F. Friedler, „An automated algorithm for throughput maximization under fixed time horizon in multipurpose batch plants: S-graph approach,” vol. 24, pp. 649 – 654, 2007.

A. függelék

Tesztesetek

product		
name	number	revenue
	1	
A	2	10
B	1	5

task	
name	pr_name
	<product name>
A1	A
A2	A
A3	A
B1	B
B2	B

equipment		
name	number	b capacity
	1	
E1	1	40
E2	1	60

precedence			
task1	task2	s_percent	d_percent
<task name>	<task name>		
A1	A2	100	50
A2	A3	50	100
B1	B2	50	50

proctime		
task_name	eg_name	time
<task name>	<equipment name>	infity
A1	E1	2
A1	E2	2
A2	E1	3
A3	E2	2
B1	E1	3
B1	E2	3
B2	E1	5
B2	E2	5

A.1. ábra. Nyolcadik teszteset bemeneti adatai

A.1. táblázat. Második példafeladat teszteseteinek második fele

Fájl név	Időhorizont	A termék	B termék	Kapacitások	Hozzárendelések	Bevétel	Megoldás ideje	Gantt
teszt06	25	2 db	1 db	A1: 100 A1_2: 100 A2: 40 A2_2: 40 A3: 40 A3_2:40 B1: 100 B2: 100	E1: A1, A1_2, A2, A2_2 B1, B2 E2: A1, A1_2, A3, A3_2, B1, B2	1300	0,162 sec	er06
teszt07	20	2 db	1 db	A1: 60 A1_2: 100 A2: 40 A2_2: 40 A3: 20 A3_2:20 B1: 60 B2: 60	E1: A1_2, A2, A2_2 E2: A1, A1_2, A3, A3_2, B1, B2	700	0,844 sec	er07
teszt08	25	2 db	1 db	A1: 100 A1_2: 100 A2: 40 A2_2: 40 A3: 20 A3_2:20 B1: 100 B2: 100	E1: A1, A1_2, A2, A2_2 B1, B2 E2: A1, A1_2, A3, A3_2, B1, B2	900	0,220 sec	er08

B. függelék

CD Melléklet tartalma

solver mappa: Az S-gráf megoldó szoftver forrásfájljait tartalmazza.

Felkészüles mappa: A keretrendszer megismerése során kézzel elkészített feladatok (makespan minimalizálás, throughput maximalizálás).

Teszteles mappa: A dolgozatban említett tesztfeladatok bemeneti adatait és megoldásait tartalmazó fájlok.

Dolgozat mappa: A dolgozat PDF változata.