



EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének
együttes javítása a Pannon Egyetemen

NETWORK SYNTHESIS AND OPTIMIZATION

by Botond Bertok

SZÉCHENYI  2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Szociális
Alap



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Outline

- I. Methods and software for network synthesis
- II. P-graph in the Optimization of Industrial Processes
- III. Combinatorial Techniques in Process Network Synthesis
- IV. Case study: Conceptual design of reaction and process network for VCM production by P-graph Studio
- V. Supply-chain modeling by P-graphs
- VI. Time constraints in process- network synthesis and optimization
- VII. References
- VIII. Further reading

I. Methods and software for network synthesis

SZÉCHENYI  2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Szociális
Alap



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Outline

- I.1 Classes of Process Network Synthesis Problems
- I.2 Conventional Approach to Process Synthesis
- I.3 Introduction to the P-graph Framework
- I.4 Computer Aided Process-Network Synthesis
- I.5 History of Methods and Software for Network Synthesis

I.1 Classes of Process Network Synthesis Problems

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

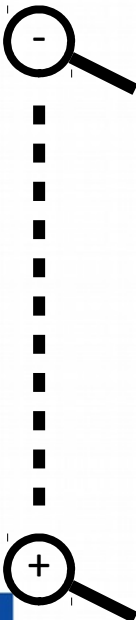
Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Levels of Abstraction

- Industrial problems because of their complexity are examined in multiple levels of abstraction:
 - Macroscopic level:
Elementary step: operating units
 - Mesoscopic level:
Elementary step: equipments
(Multiple equipments forms an operating unit.)
 - Microscopic level:
Elementary step: physical / chemical / biochemical transformation
(Inside one equipment.)



Levels of Abstraction: Component Problems

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

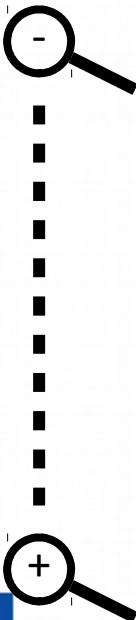
- **Macroscopic level: Conceptual design**
 - Reaction-Network Synthesis
 - Total-Flowsheet Synthesis
- **Mesoscopic level:**
 - Separation-Network Synthesis
 - Heat-Exchanger-Network Synthesis
 - Scheduling
 - Process Control
- **Microscopic level:**
 - Azeotropic Distillation
 - Reaction Pathway Identification



Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE



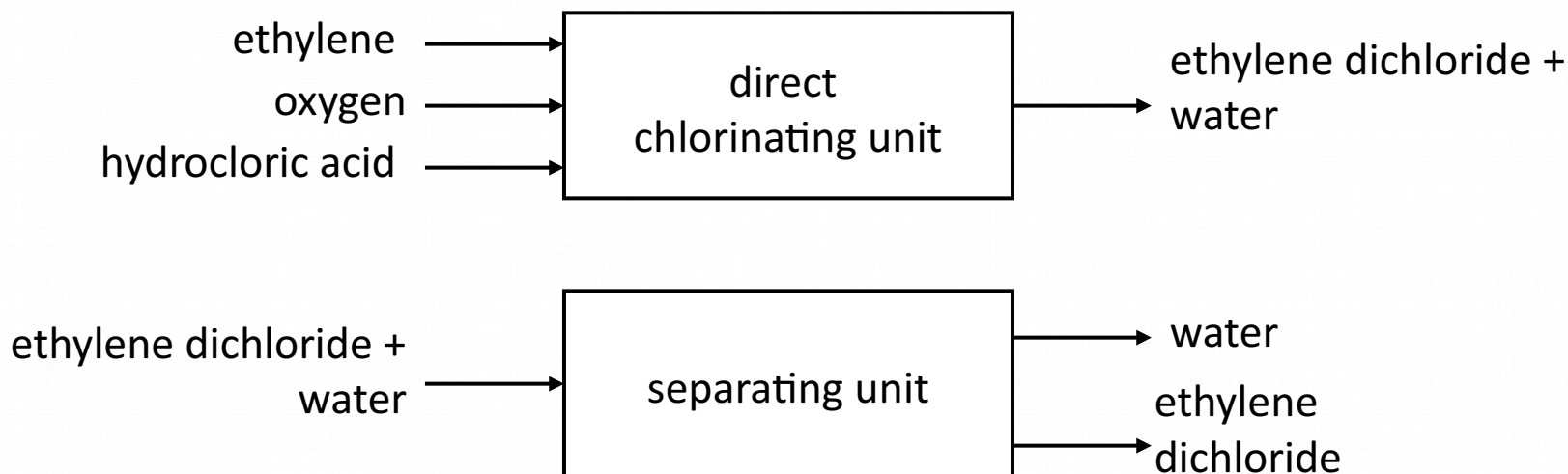
Macroscopic Level: Operating Units

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- Component problem: Total-Flowsheet Synthesis
 - Building blocks: operating units

Example:

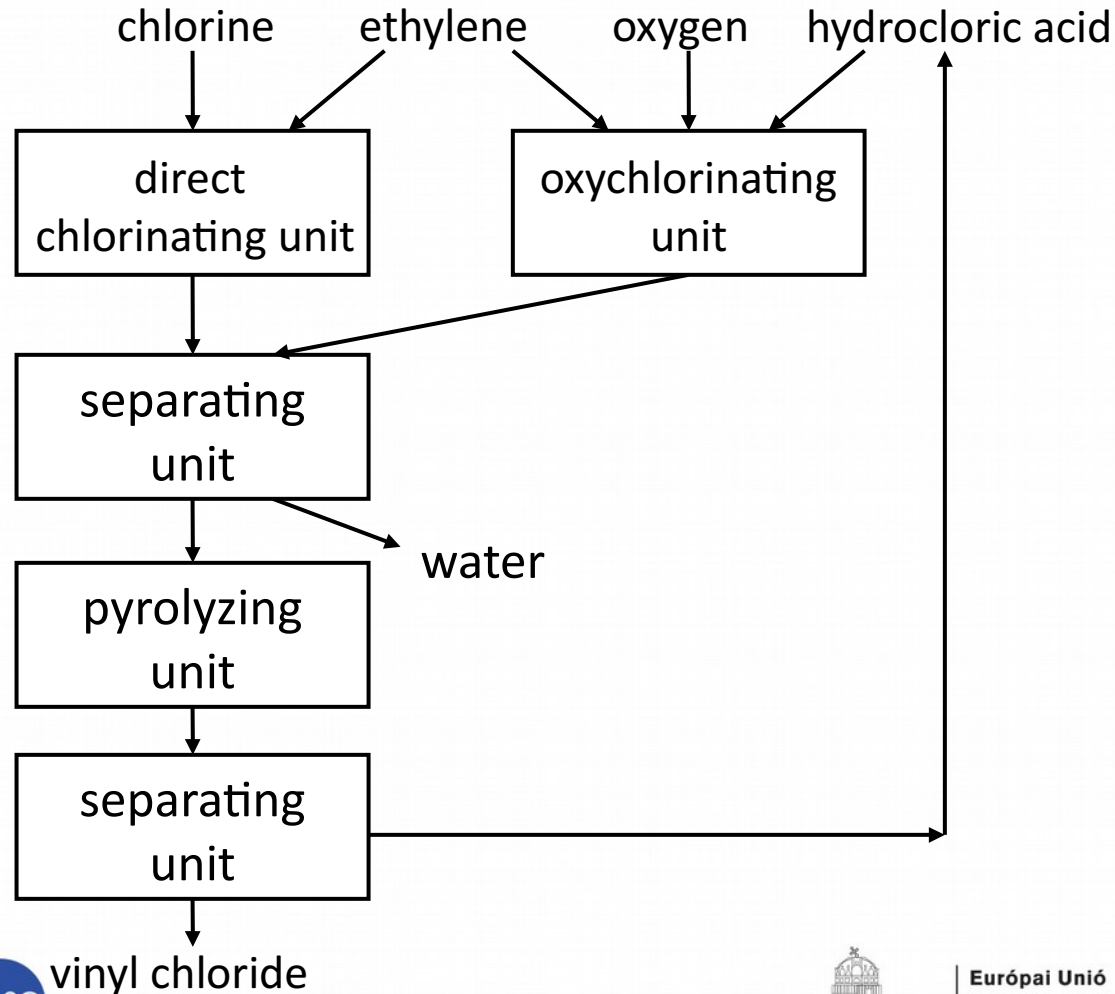


Macroscopic Level: Network of Operating Units

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

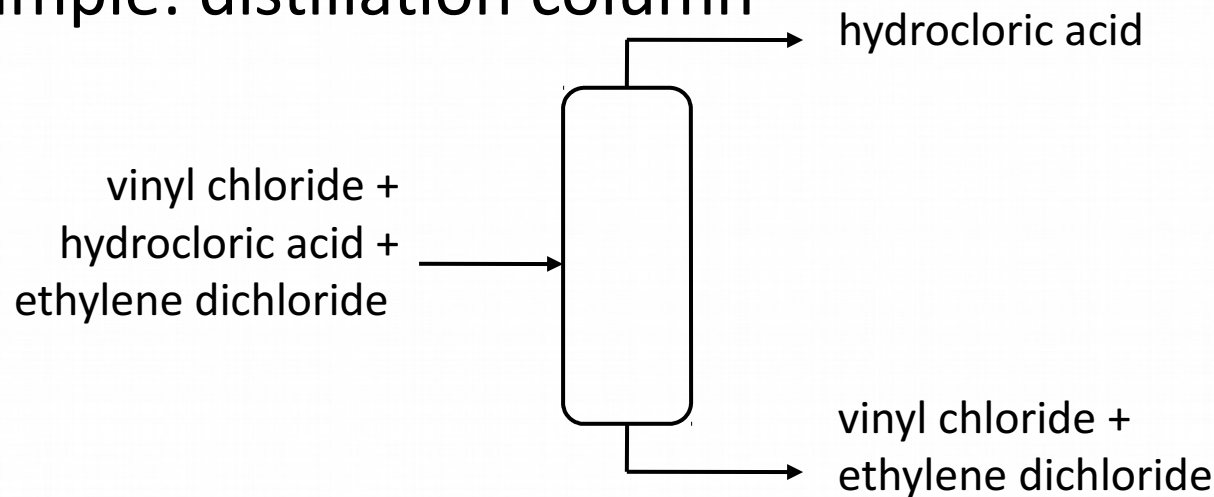
Example:



Mesoscopic level: Equipments

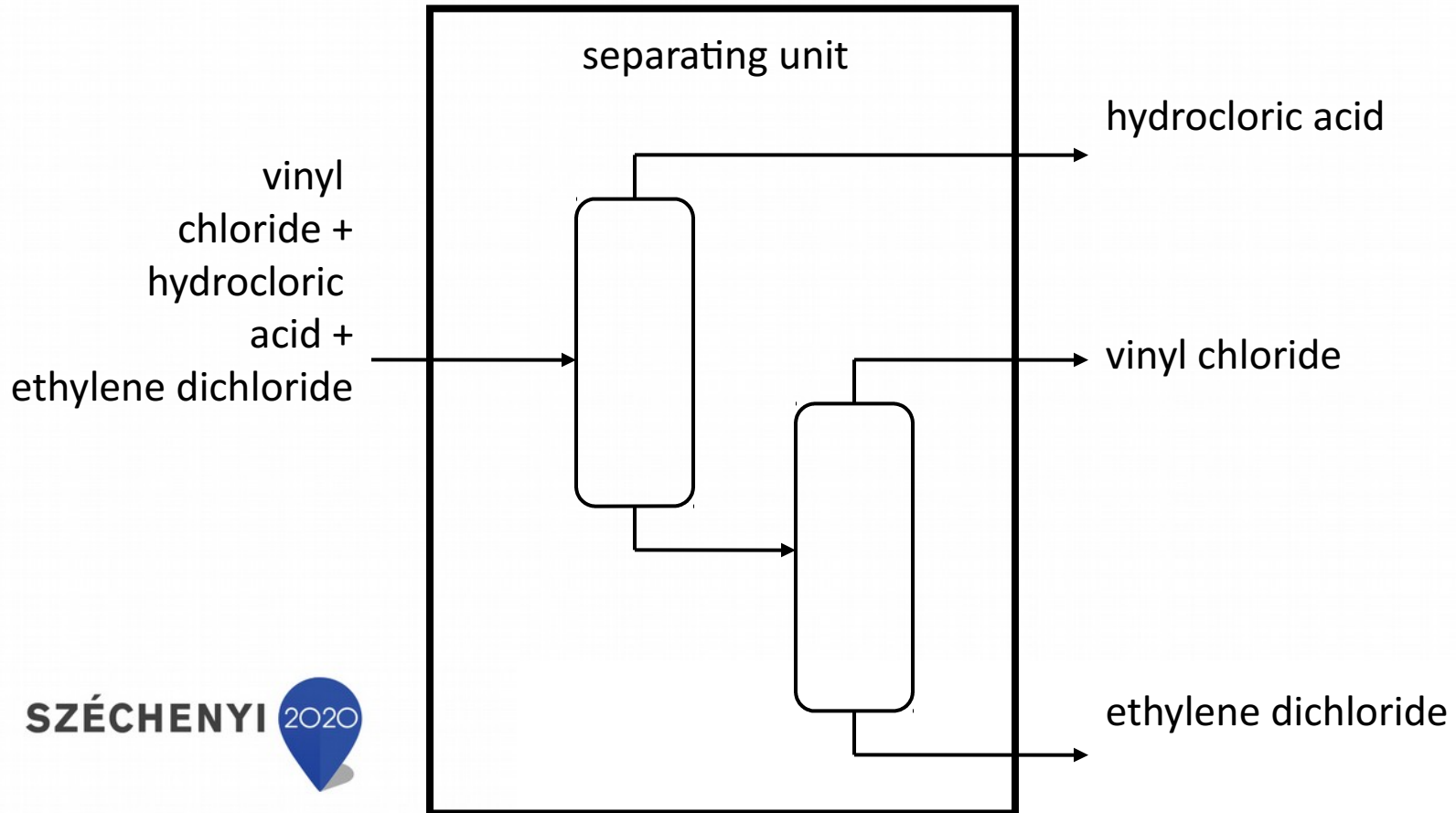
- Component problem:
Separation-Network Syntehsis
 - Building blocks: equipments

Example: distillation column



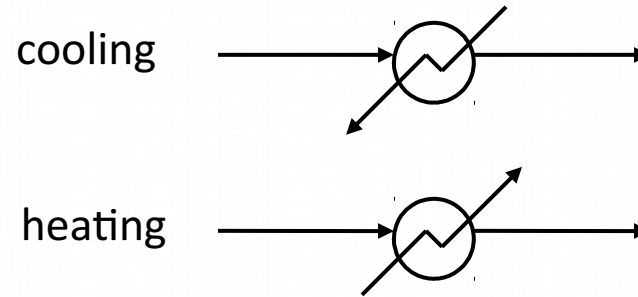
Mesoscopic level: Network of Equipments

Example: implementing separating unit by two distillation columns



- Component problem:
Heat-Exchanger-Network Synthesis
 - Building blocks: physical transformations

Example:

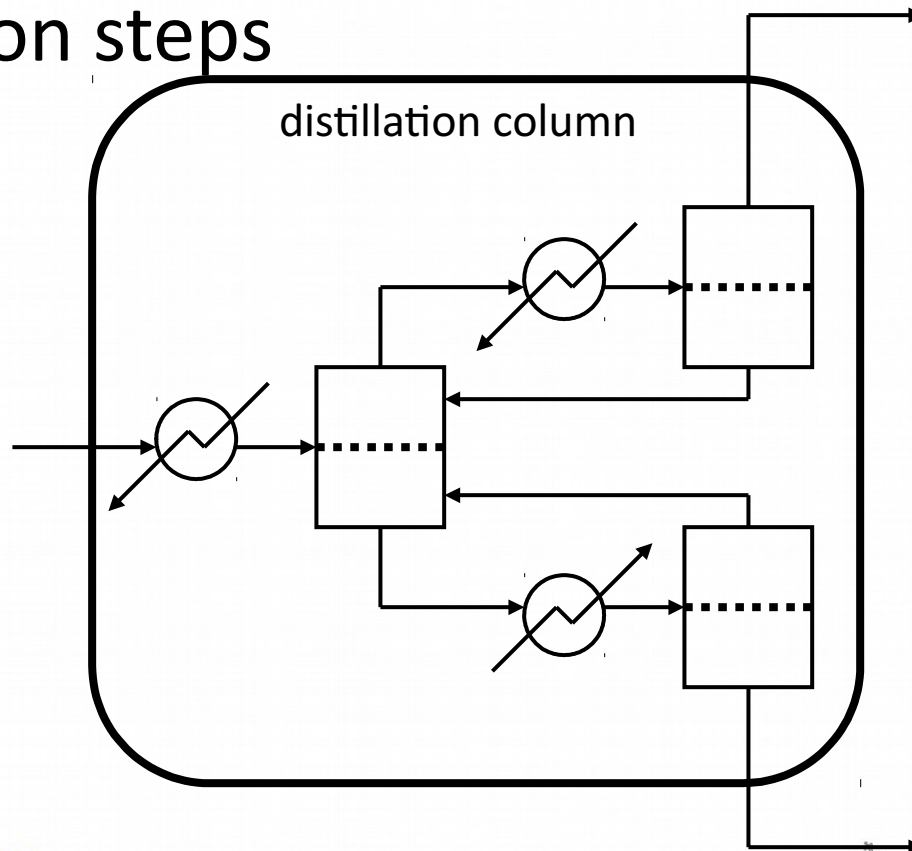


Microscopic Level: Network of Physical Transformations

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Example: distillation column with three distillation steps



I.2 Conventional Approach to Process Synthesis

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Why is Process Synthesis Crucial in PSE?

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és
hozzáférhetőségének együttes javítása
a Pannon Egyetemen

“Process synthesis can typically **reduce** energy
consumption by 50% and **net-present cost**
by 35%” (Sirola, Eastman Kodak, 1996).

Note:

The **structure has the major effect** on the
efficacy of the process to be designed

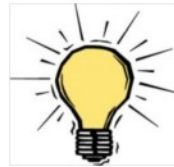
Process Simulation vs. Process Synthesis

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- Process Simulation

Idea



Evaluate



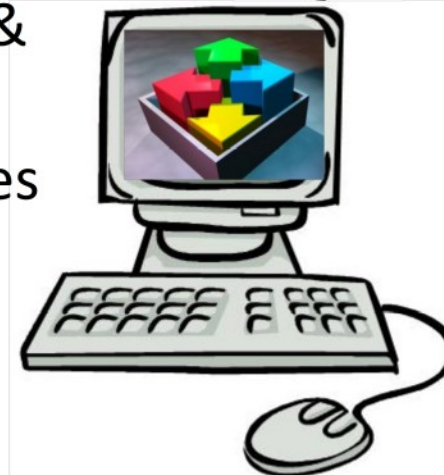
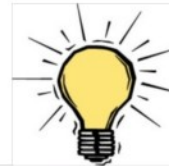
- Process Synthesis



Define Target

SZÉCHENYI 2020

Generate & Optimize Alternatives



Evaluate



Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



Process Synthesis Problems

<i>Level of abstraction</i>	Synthesis Problems						
<i>Macroscopic</i>	Conceptual Process Design						
<i>Mezoscopic</i>	Reaction Network Synthesis	Waste Treatment	Separation Network Synthesis	Heat Integraton	Control Design	Reliability Analysis	Scheduling
<i>Microscopic</i>	Reaction Pathway Identification		Azeotropic Distillation		Startability Analysis		Time Constraints

Process Synthesis Problems

Level of abstraction	Synthesis Problems						
<i>Macroscopic</i>	Conceptual Process Design 1990-						
<i>Mezoscopic</i>	Reaction Network Synthesis	Waste Treatment	Separation Network Synthesis	Heat Integration	Control Design	Reliability Analysis	Scheduling
<i>Microscopic</i>	Reaction Pathway Identification		Azeotropic Distillation		Startability Analysis		Time Constraints

Conventional Approach

to Solve Process Design and Operations Problems

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- Formulation as a general mathematical programming problem (e.g., LP, MILP, MINLP, NLP)
- Application of a general-purpose solver (e.g., GAMS)



Conventional Mathematical Programming

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Mathematical programming problem
(objective function, constraints)



General purpose solver



Optimal solution



Process synthesis problems are not specified
as standard optimization problems

Process Synthesis Problem

- Given:
 - set of products,
 - set of raw materials,
 - mathematical models of the operating units
- Generate:
 - optimal process or
 - n -best processes or
 - every feasible process
- Optimality criteria:
 - cost, waste generation, controllability, risk, or
 - combinations of them

Algorithmic Process Synthesis

Cost function and constraints for the
operating units, raw materials, and products



Model generation: Synthesis
(Generating LP, MILP, MINLP, or NLP model)



Mathematical programming model



Solution: Analysis
(Mathematical programming method)



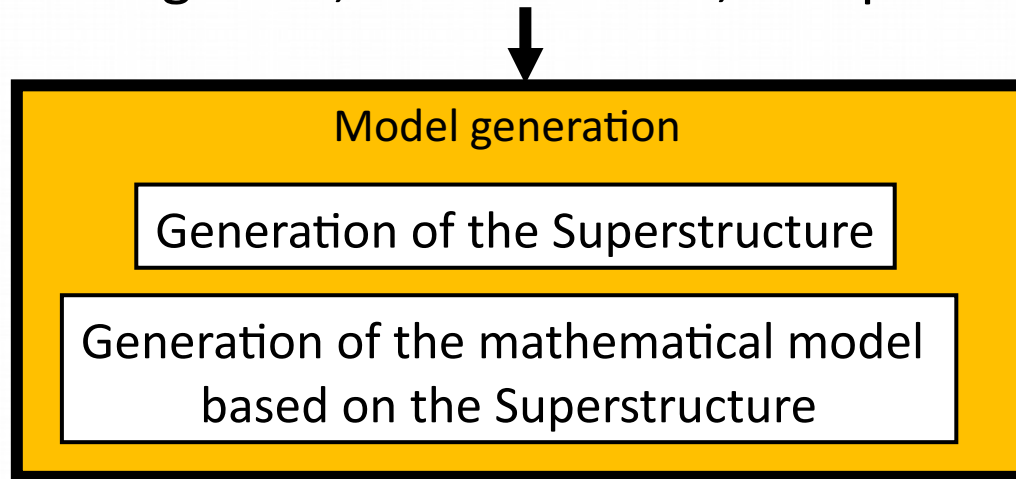
Optimal solution



Question

How to generate and how to solve the
mathematical programming model?

Cost function and constraints for the operating units, raw materials, and products



Mathematical programming model

Solution of the model

Optimal solution

Question

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

How to generate the superstructure?



I.3 Introduction to the P-graph Framework

SZÉCHENYI  2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Rigorous Superstructure

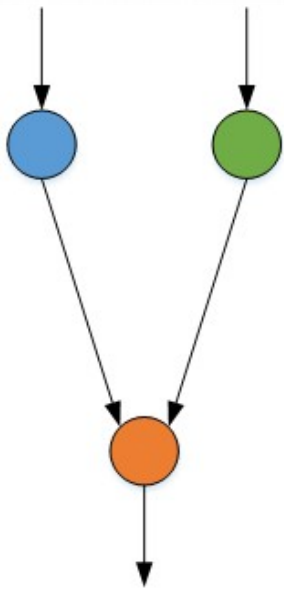
- Suppose that systematic procedure is available so that a valid mathematical programming model can be generated for a network of the given operating units
- A network of operating units is defined to be a rigorous super-structure if the optimality of the resultant solution cannot be improved for any instance of the class of problems by any other procedure for network and model generation

Graph Representation in Process Synthesis

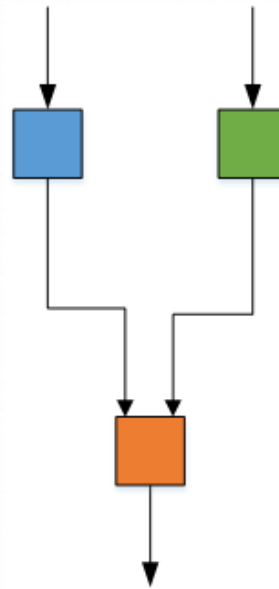
EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

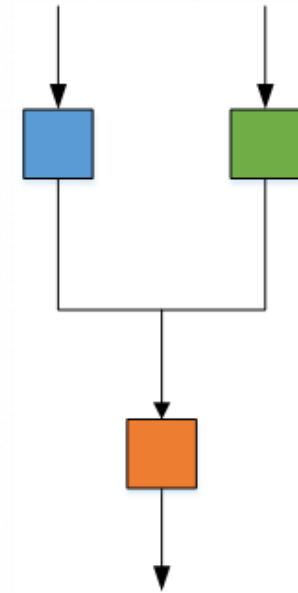
Simple directed graph is not sufficient for representing process structures



directed graph



synthesis problem 1
1 solution



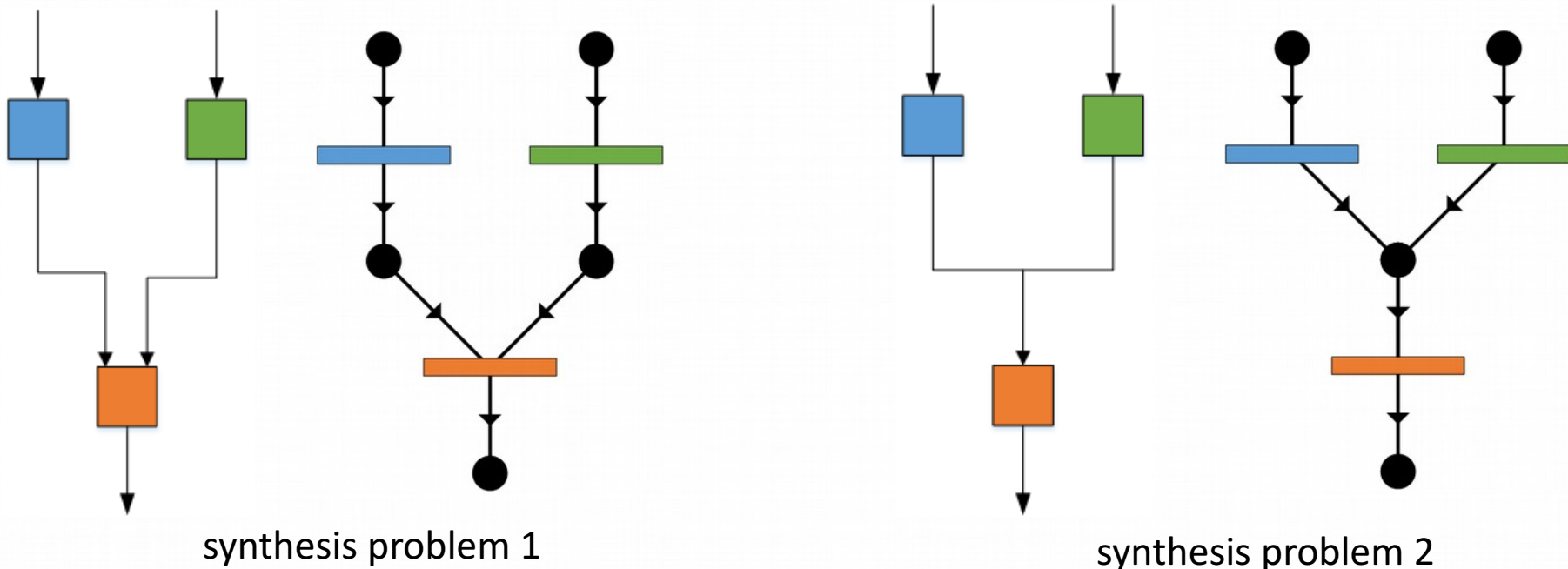
synthesis problem 2
3 solutions

Graph Representation in Process Synthesis

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

P-graph* representation of the two synthesis problems



*F. Friedler, K. Tarjan, Y. W. Huang, L. T. Fan: Graph-Theoretic Approach to Process Synthesis: Axioms and Theorems, Chem. Engng Sci., **47**, pp. 1973-1988 (1992)

P-graph Framework

(F. Friedler & L. T. Fan, 1990)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Three cornerstones of the P-graph Framework





- Structural representation: **P-graph**
- **Axioms** of the combinatorially feasible process networks
- **Algorithms** for
 - Generating the **rigorous superstructure**
 - Generating the **combinatorially feasible process structures**
 - Generating **optimal or n -best networks**

P-graph Framework: Structural Representation

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és
hozzáférhetőségének együttes javítása
a Pannon Egyetemen

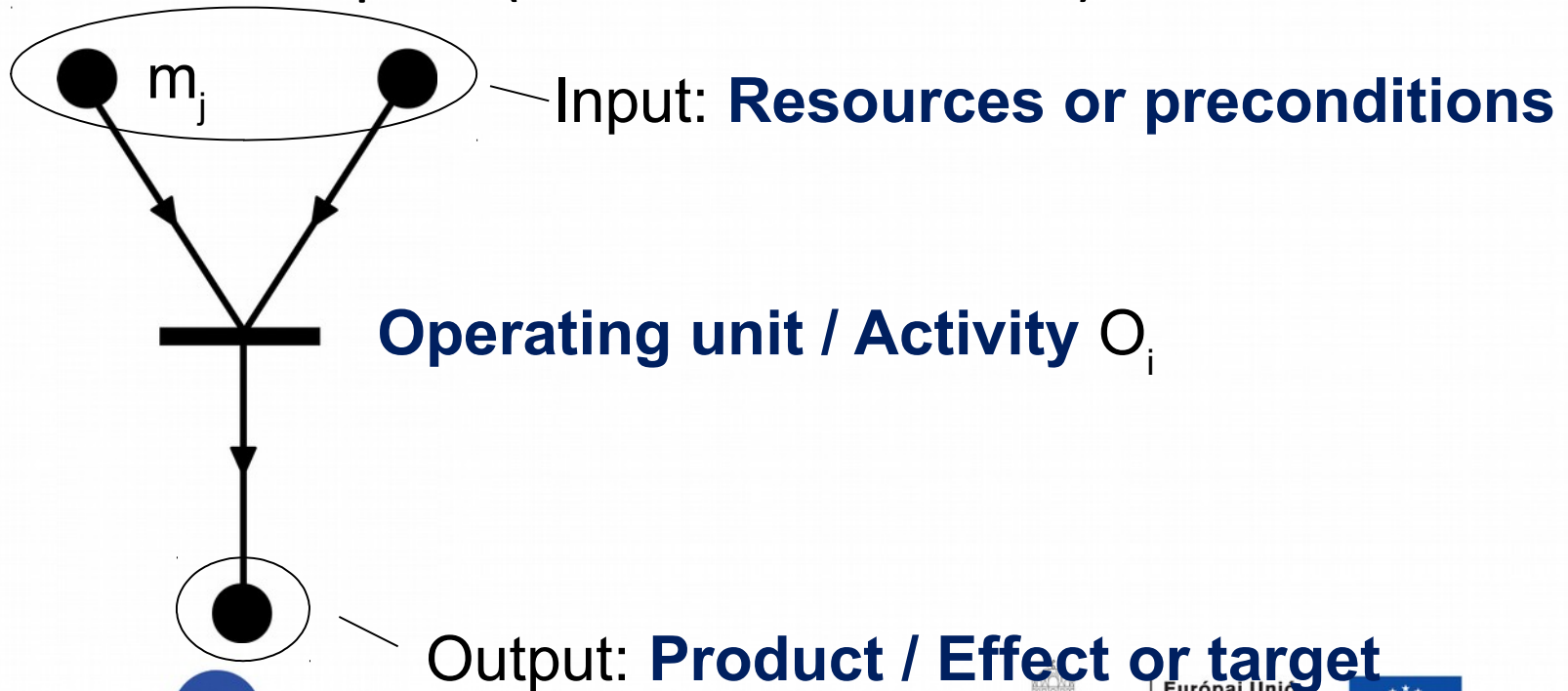
Unambiguous representation of structural properties

Process element	P-graph representation
Resource or precursor	
Final target	
Intermediate entity	
Activity	

P-graph Framework: Structural Representation (Cont'd)

Bipartite graph

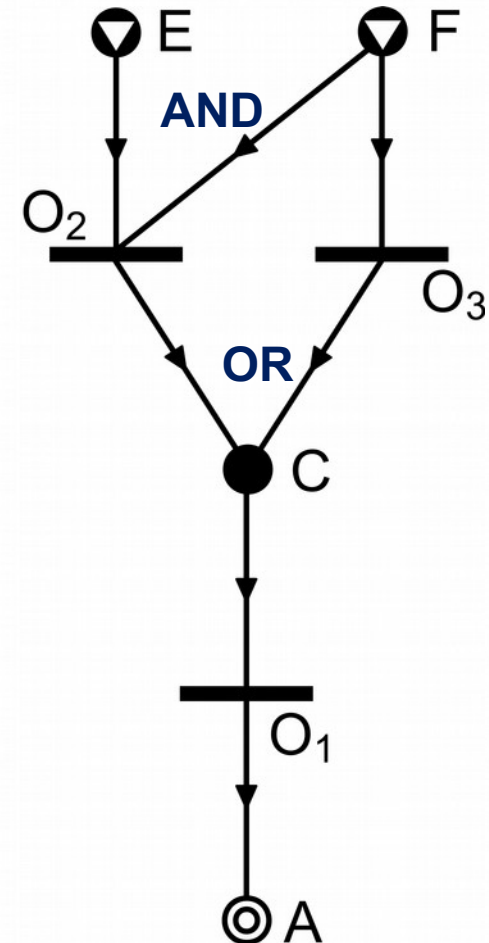
- Operating units / activities
- Inputs and outputs (materials / entities)



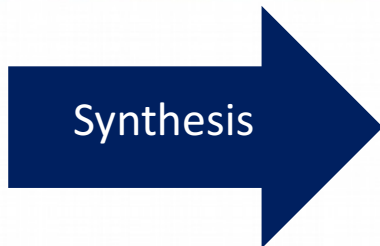
P-graph Framework: Structural Representation (Cont'd)

Clear logical interpretation

- Each input material (E **AND** F) has to be available to operate a unit (O_2)
- Any of the operating units (O_2 **OR** O_3) having the same output material can potentially be sufficient to initiate the consecutive operating unit (O_1)






Process Synthesis by the P-graph Framework



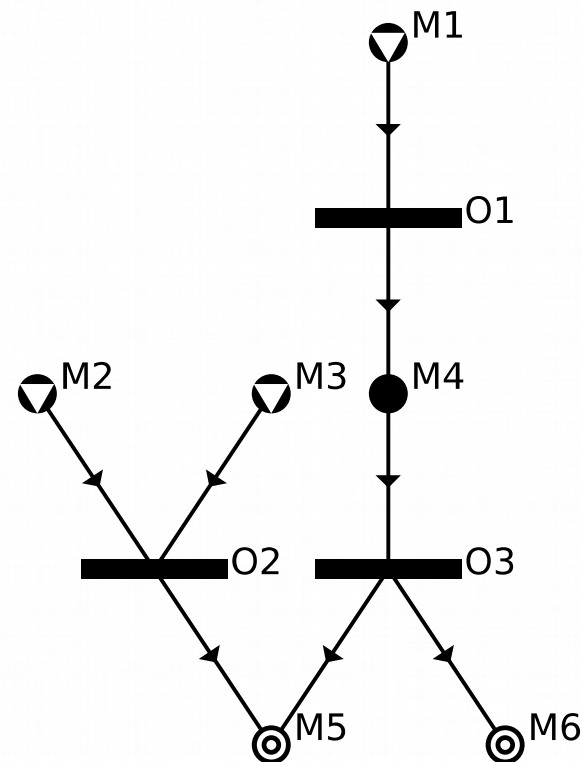
Process structure

Building blocks

– materials

- raw materials: 
- products: 
- intermediates: 

– operating units:



Axioms of Combinatorial Feasible Process Structures (Friedler et al., 1992)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és
hozzáférhetőségének együttes javítása
a Pannon Egyetemen

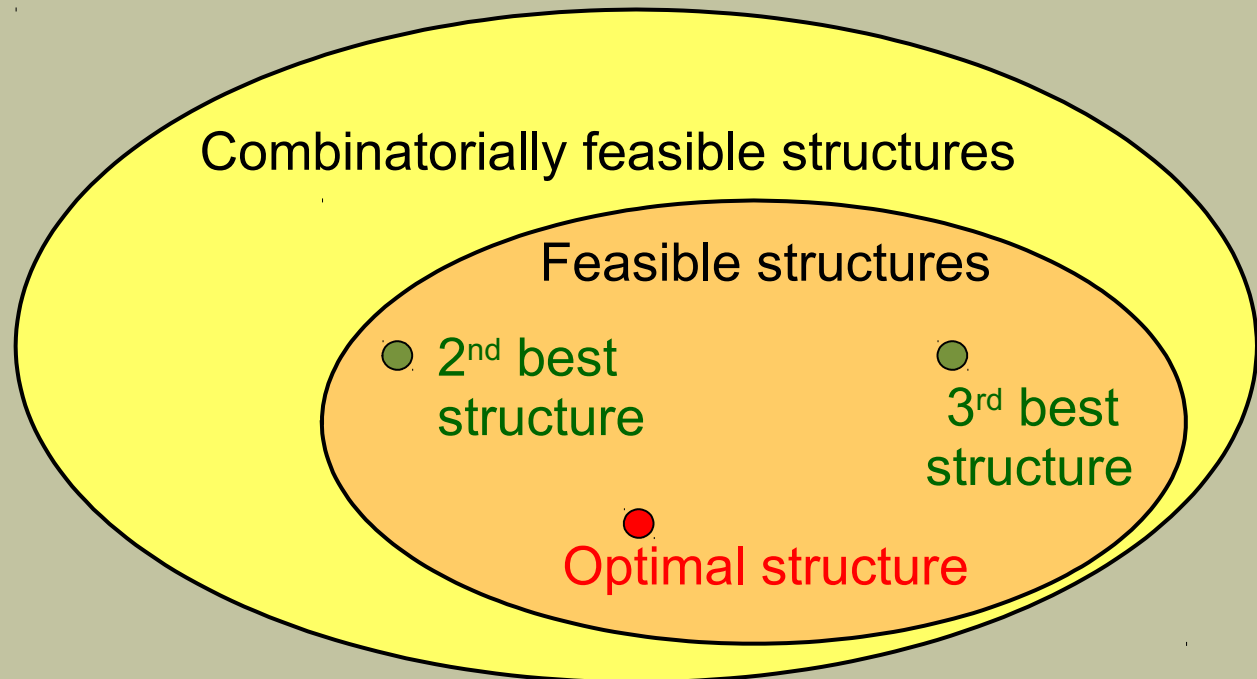
- (S1) Every final product is represented in the graph.
- (S2) A vertex of the material type has no input if and only if it represents a raw material.
- (S3) Every vertex of the operating unit type represents an operating unit defined in this synthesis problem.
- (S4) Every vertex of the operating unit type has at least one path leading to a vertex of the material type representing a final product.
- (S5) If a vertex of the material-type belongs to the graph, it must represent an input to or output from at least one operating unit represented in the graph.

P-graph Framework: Reduction of the Search Space

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és
hozzáférhetőségének együttes javítása
a Pannon Egyetemen

Search Space



P-graph Framework: Algorithms (Friedler et al., 1992, 1993, 1995)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

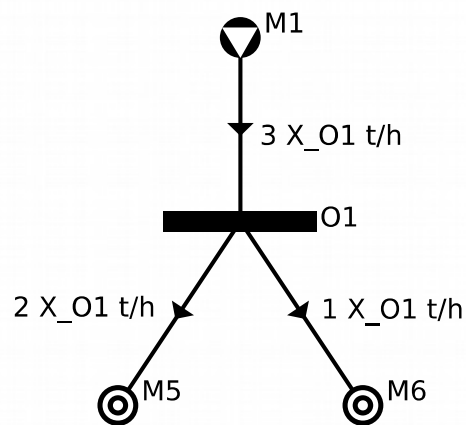
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- Algorithm **MSG** (Maximal Structure Generation) generates the **rigorous superstructure**: the union of the combinatorially feasible structures.
- Algorithm **SSG** (Solution-Structure Generator) generates each **combinatorially feasible structure** exactly once.
- Algorithm **ABB** (Accelerated Branch and Bound) generates the ***n*-best solutions** of the problem while the search space is reduced to the set of combinatorially feasible structures.

Capacities of Operating Units as Design Variables

Definition of operating unit O1

Cost: $4 X_{O1} + 20$ \$/h

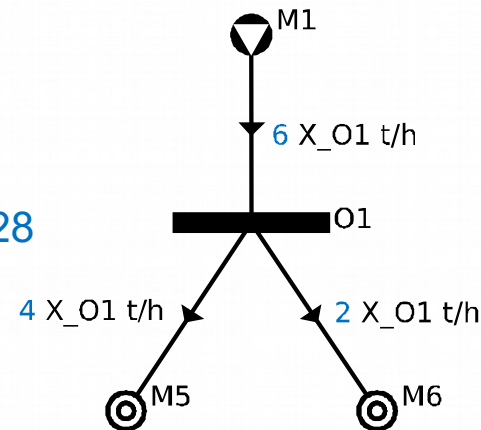


X_{O1} : capacity multiplier (dimensionless variable)

Two potential realizations of O1

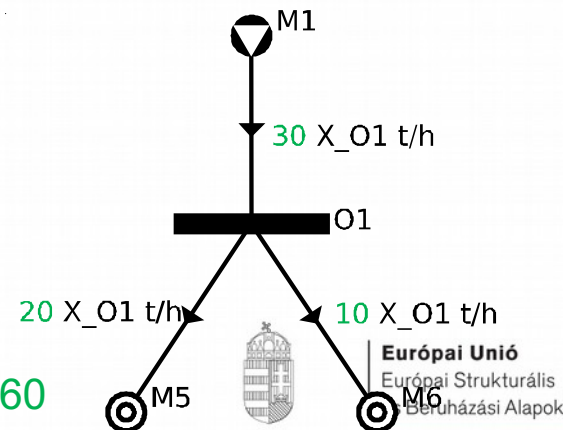
Cost: $4x2 + 20 = 28$

$X_{O1} = 2$



$X_{O1} = 10$

Cost: $4x10 + 20 = 60$



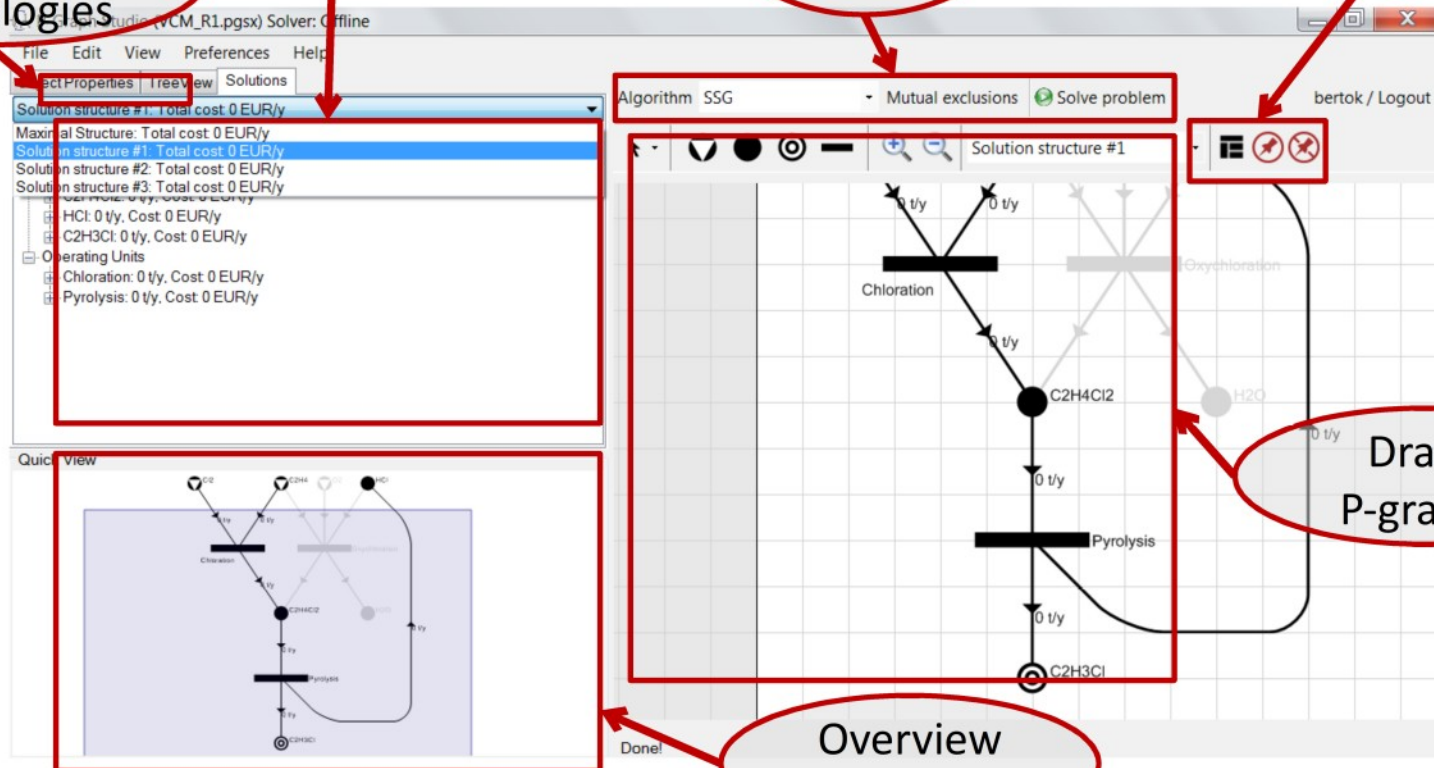
Software P-graph Studio

Define Technologies

Analyze Networks

Synthesize Optimal and Alternative Processes

Auto-arrange layout



Draw P-graphs

Overview Flowsheets

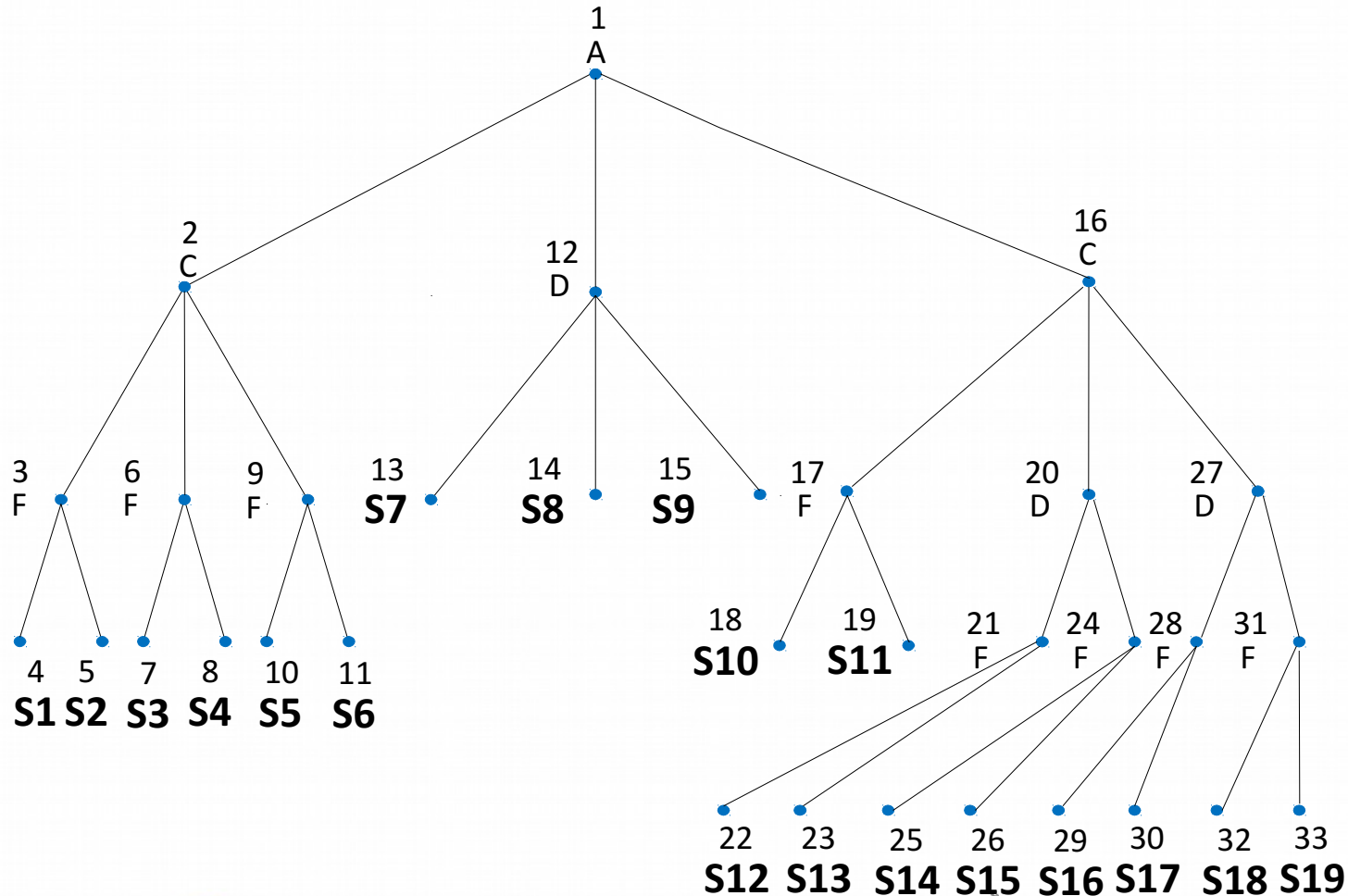
MINLP vs. P-graph framework

	MINLP	P-graph framework
Problem given by	Variables, Constraints	Raw materials, products, operating units
Generation of the math. model	Manual	Automatic
Structural properties of process-networks	Hidden in the math. model	Exploited
Number of solutions	Single	Multiple
Handling special constraints	Can be incorporated to the math. model	May require modifications of the model generator and solver

P-graph Approach: Decision on the Productions of Materials

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

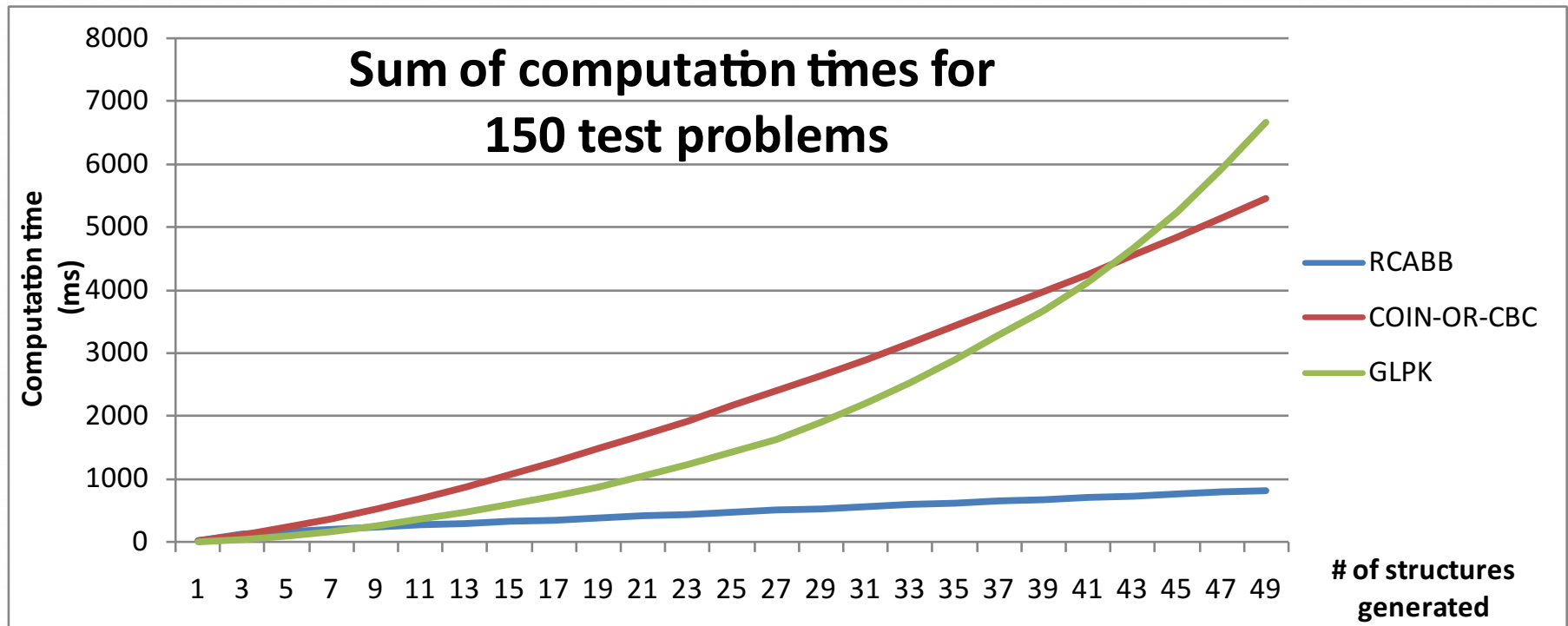


Comparison of P-graph Solver RCABB and Open Source MILP Solvers

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- Computation times: Smaller is better



Publications on the P-graph Framework

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- Friedler, F., K. Tarjan, Y. W. Huang, and L. T. Fan, Process Synthesis by Exploiting the Combinatorial Properties of Feasible Process Structures, presented at the Fourth World Congress of Chemical Engineering, Karlsruhe, Germany, June 16-21, 1991; also published in the Proceedings of the Congress, paper 12.2-5.
- Friedler, F., K. Tarjan, Y. W. Huang, and L. T. Fan, Combinatorial Algorithms for Process Synthesis, Computers Chem. Engng, 16, S313-320 (1992).
- Friedler, F., K. Tarjan, Y. W. Huang, and L. T. Fan, Graph-Theoretic Approach to Process Synthesis: Polynomial Algorithm for Maximal Structure Generation, Computers Chem. Engng, 17, 929-942 (1993).
- Friedler, F., J. B. Varga, and L. T. Fan, Decision-Mapping: A Tool for Consistent and Complete Decisions in Process Synthesis, Chem. Engng Sci., 50, 1755-1768 (1995).

I.4 Computer Aided Process- Network Synthesis

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok

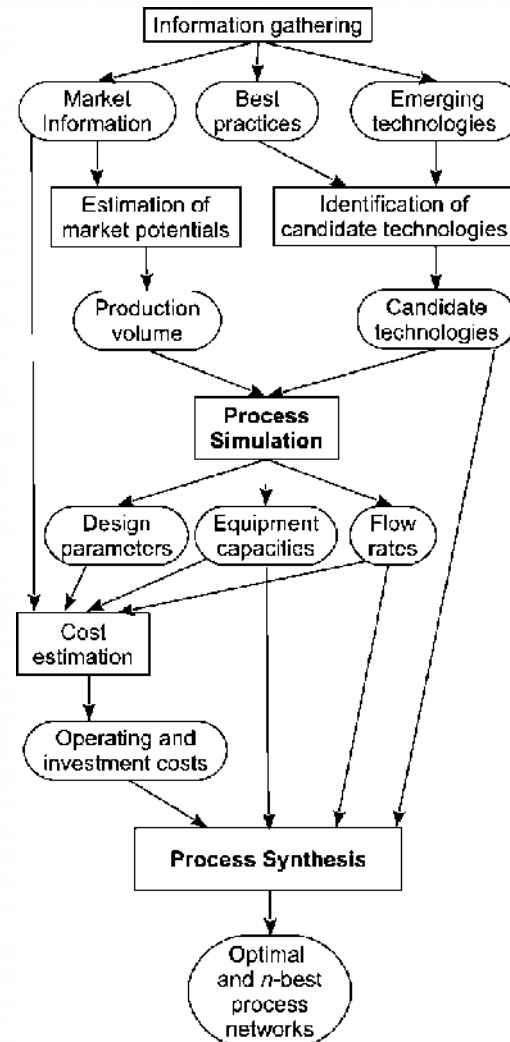


BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Computer Aided Process- Network Synthesis: Overview

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



I.5 History of Methods and Software for Network Synthesis

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Process Synthesis Problems

Level of abstraction	Synthesis Problems						
<i>Macroscopic</i>	Conceptual Process Design 1990-						
<i>Mezoscopic</i>	Reaction Network Synthesis	Waste Treatment	Separation Network Synthesis	Heat Integration	Control Design	Reliability Analysis	Scheduling
<i>Microscopic</i>		Reaction Pathway Identification	Azeotropic Distillation	Startability Analysis	Time Constraints		

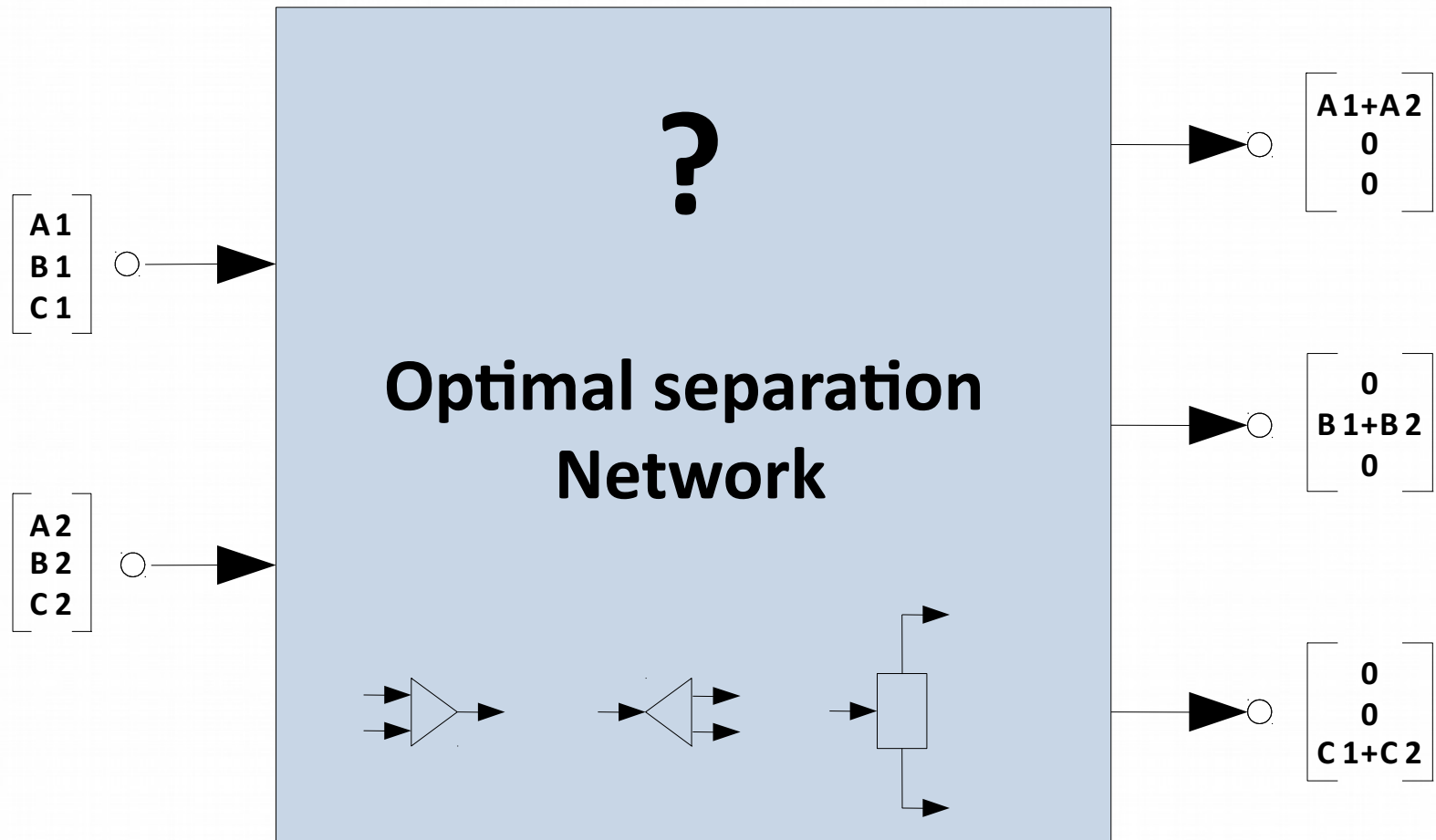
Process Synthesis Problems

Level of abstraction	Synthesis Problems						
<i>Macroscopic</i>	Conceptual Process Design 1990-						
<i>Mezoscopic</i>	Reaction Network Synthesis	Waste Treatment	Separation Network Synthesis 1993-	Heat Integration	Control Design	Reliability Analysis	Scheduling
<i>Microscopic</i>	Reaction Pathway Identification		Azeotropic Distillation		Startability Analysis		Time Constraints

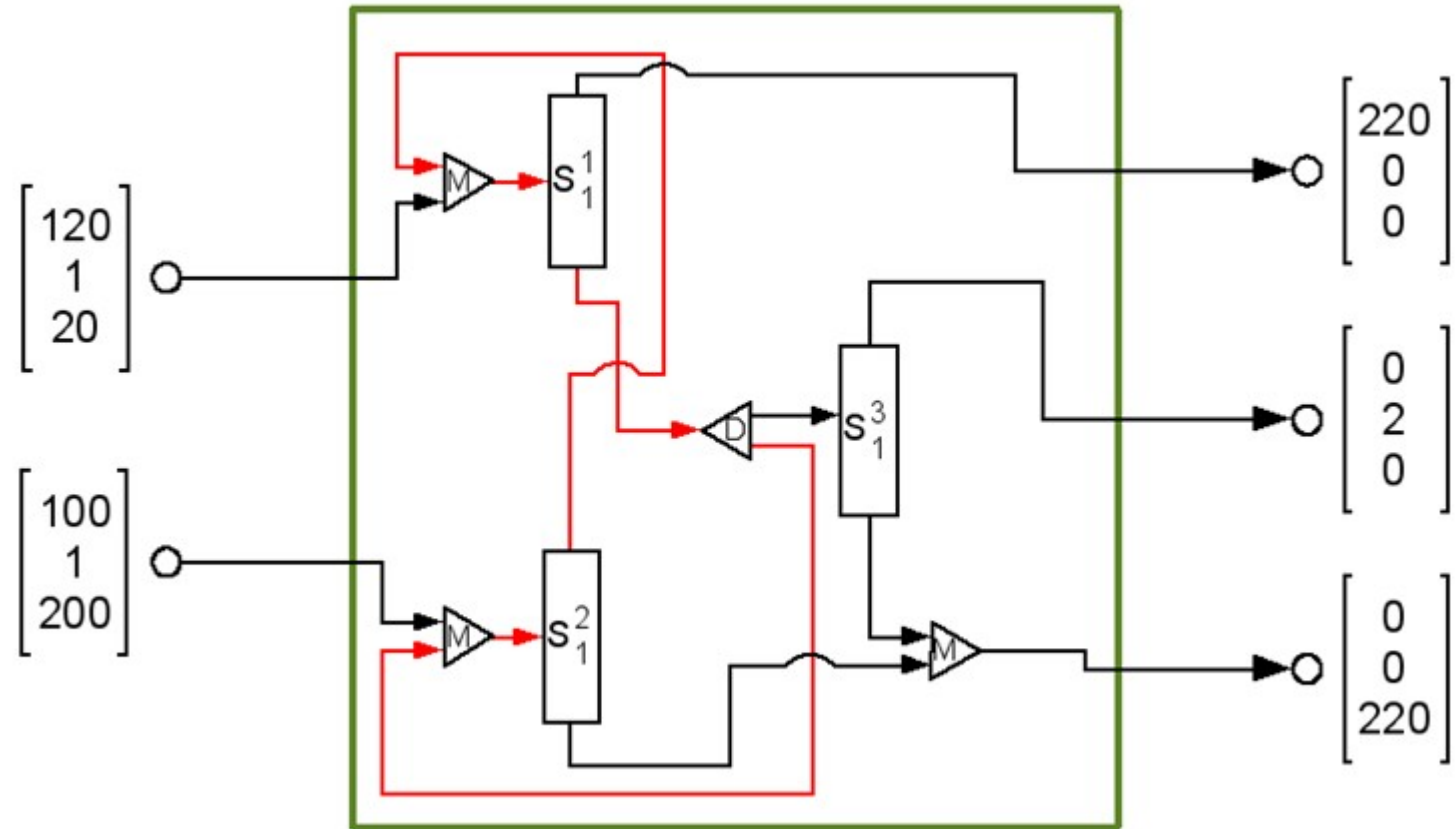
Separation Network Synthesis (SNS)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Unexpected: Loop



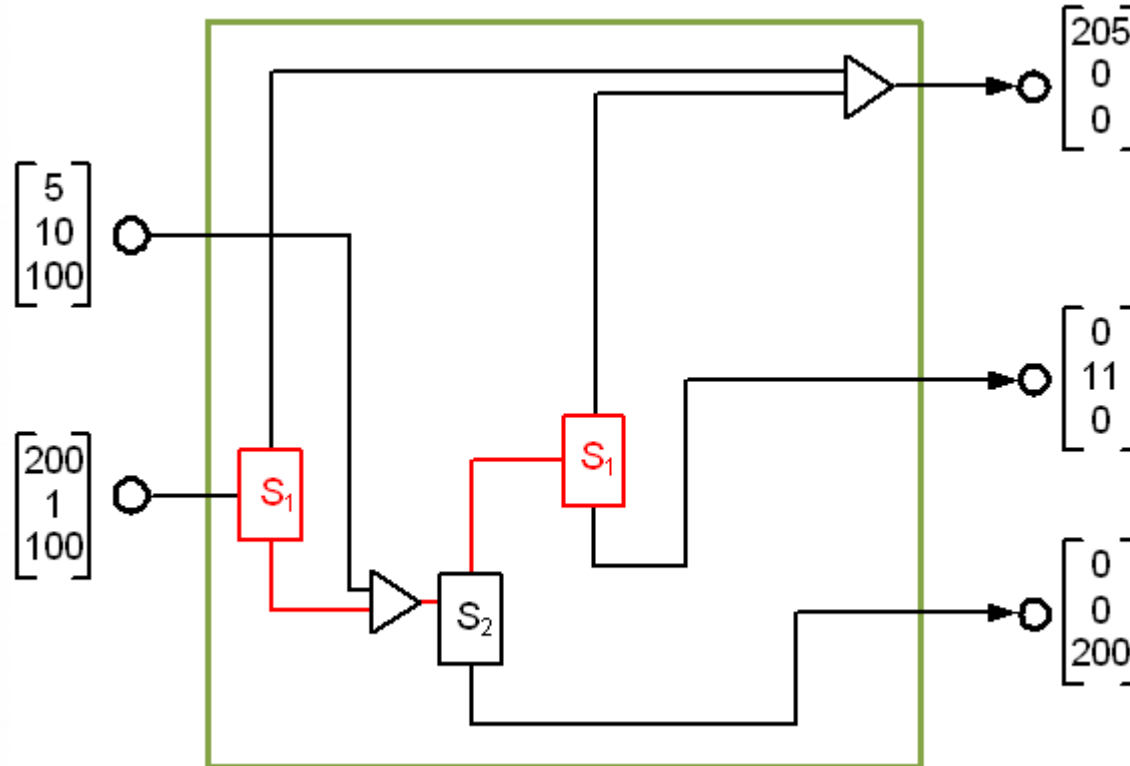
Optimal network

Kovacs, Z., F. Friedler, and L. T. Fan, Recycling in a Separation Process Structure, *AIChE J.*, **39**, 1087-1089 (1993)

Unexpected: Redundancy

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



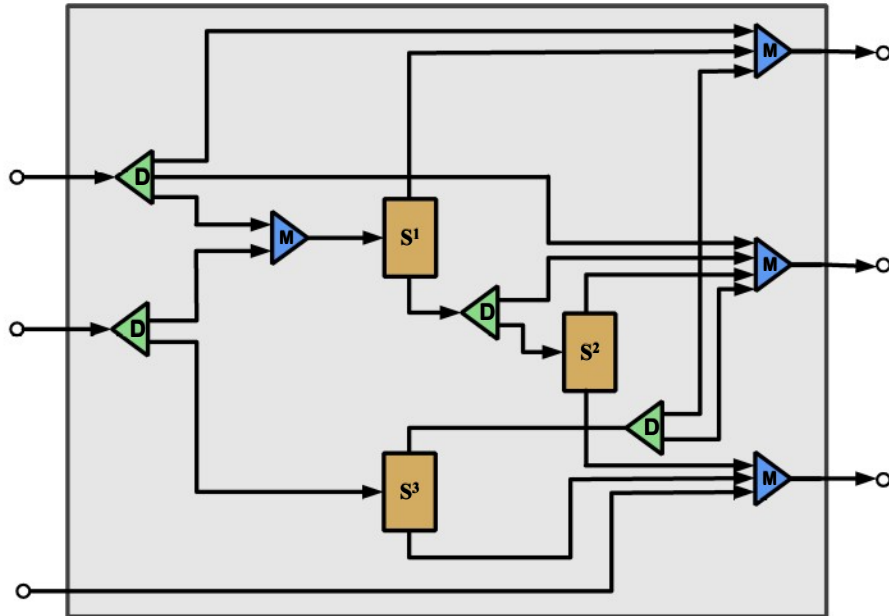
Summary of Structural Properties of Optimal Separation Networks

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

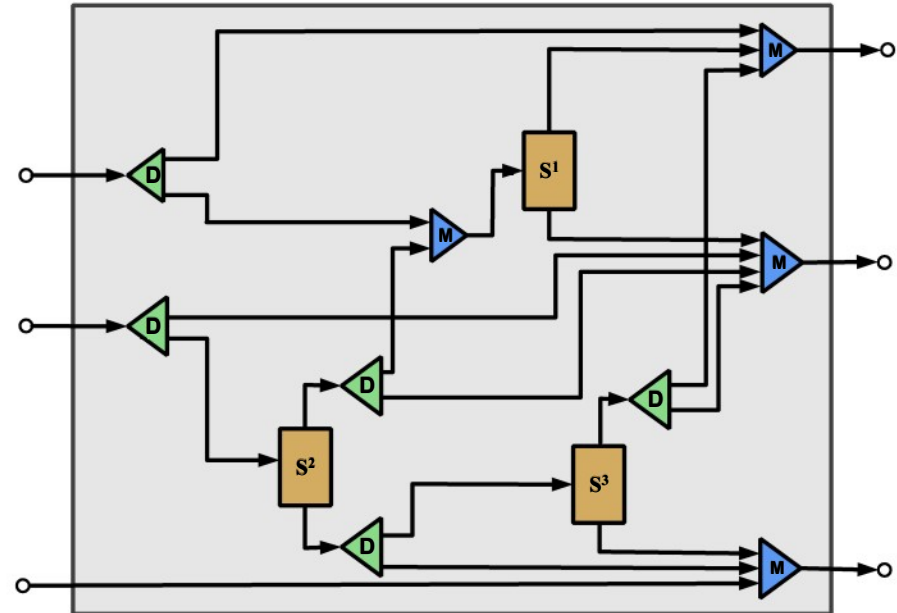
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Product streams	Pure		Multicomponent	
	Single	Multiple	Single	Multiple
recycling	impossible	possible	possible	possible
redundancy	impossible	possible	possible	possible
premixing	impossible	possible	impossible	possible
bypassing	impossible	impossible	possible*	possible*

Comparison of Structures Obtained



Comp. Chem. Eng., 1995
 Incomplete maximal structure
 Cost: 138.7



Comp. Chem. Eng., 2000
 Complete maximal structure
 Cost: 104.3

Alternative Flowsheets Generated by P-graph Software

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Solution #	Comment	Cost
1	Optimal flowsheet	104,27
2	2nd best structure	104,71
3	3rd best structure	105,70
...		
100		116,02
...		
1000		130,00
...		
2000		135,53
...		
2868	Published in the literature as optimal	138,70

Software for SNS

The screenshot displays two windows. The left window, titled 'SNS-LIN - e2', shows a software interface with the following sections:

- Feed-streams:** A grid of input values:

6	4	0	0
8	6	10	6
0	0	5	5
- Product-streams:** A grid of constraints and their sums:

>=9	<=3	<=3	=0	sum:	=15
?	>=7	>=7	?	sum:	=20
=0	?	?	>=9	sum:	=15
- Degrees of Difficulties:** A row of values: 4, 1.5, 4.

The right window, titled 'Mozilla Firefox', displays the results of an optimization process:

Optimal Network with Combined Operating Units:

Cost of the optimal solution: 104.267
 Number of separators: 3

separator7:
 type: 2
 stream from [divider4](#) (5.333, 4.000, 6.667, 4.000)
 top stream to [divider18](#) (5.333, 4.000, 0.000, 0.000)
 bottom stream to [divider15](#) (0.000, 0.000, 6.667, 4.000)

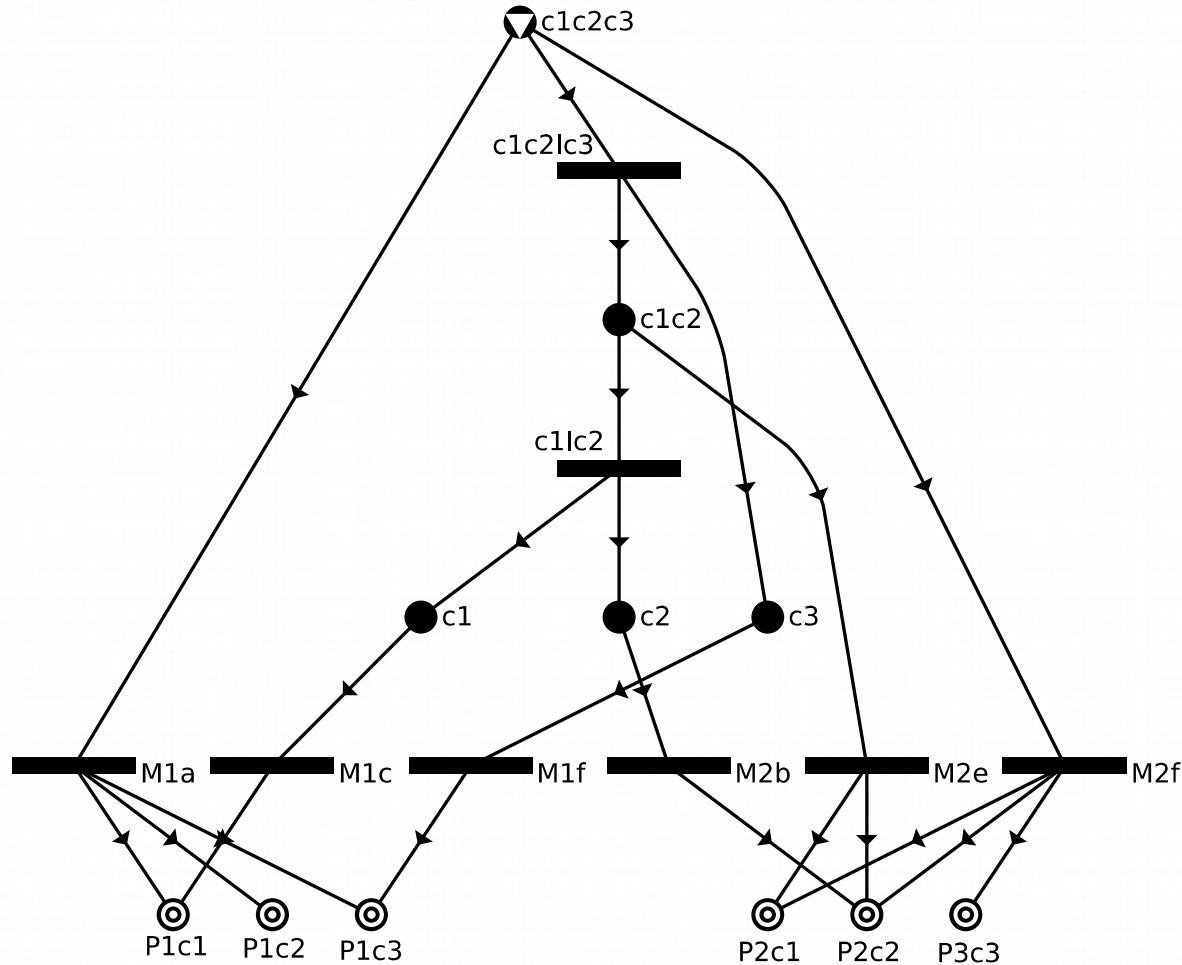
separator8:
 type: 3
 stream from [divider15](#) (0.000, 0.000, 5.667, 3.400)
 top stream to [divider17](#) (0.000, 0.000, 5.667, 0.000)
 bottom stream to [mixer1-16d](#) (0.000, 0.000, 0.000, 3.400)

mixer9-15s:
 stream from [divider18](#) (4.000, 3.000, 0.000, 0.000)

The status bar at the bottom of the Firefox window shows 'Kész' and 'Proxy: uni-pannon2'.

SNS Formulated by P-graphs

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Publications on Separation Network Synthesis

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- Kovacs, Z., F. Friedler, and L. T. Fan, Redundancy in Separation Networks for Waste Elimination, presented at the Conference on Hazardous Waste Research, Manhattan, KS, U.S.A., May 25-26, 1993.
- Kovacs, Z., Z. Ercsey, F. Friedler, and L. T. Fan, Separation-Network Synthesis: Global Optimum through Rigorous Super-Structure, Computers Chem. Engng, 24, 1881-1900 (2000).
- Heckl, I., F. Friedler, and L. T. Fan, Integrated Synthesis of Optimal Separation and Heat Exchanger Networks Involving Separations Based on Various Properties, Heat Transfer Engineering, 26(5), 25-41 (2005).
- Heckl, I., F. Friedler, and L. T. Fan, Solution of separation network synthesis problems by the P-graph methodology, Computers & Chemical Engineering, 34(5), 700-706 (2010).

Process Synthesis Problems

Level of abstraction	Synthesis Problems						
<i>Macroscopic</i>	Conceptual Process Design 1990-						
<i>Mezoscopic</i>	Reaction Network Synthesis	Waste Treatment	Separation Network Synthesis 1993-	Heat Integration	Control Design	Reliability Analysis	Scheduling
<i>Microscopic</i>	Reaction Pathway Identification		Azeotropic Distillation		Startability Analysis		Time Constraints

Process Synthesis Problems

Level of abstraction	Synthesis Problems						
<i>Macroscopic</i>	Conceptual Process Design 1990-						
<i>Mezoscopic</i>	Reaction Network Synthesis	Waste Treatment 1994-	Separation Network Synthesis 1993-	Heat Integration	Control Design	Reliability Analysis	Scheduling
<i>Microscopic</i>	Reaction Pathway Identification		Azeotropic Distillation		Startability Analysis		Time Constraints

P-graph

- Raw material
- Required product
- Potential Product
- Disposable byproduct
- Intermediate



Axioms of Combinatorially Feasible Process Structures with Waste Treatment

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

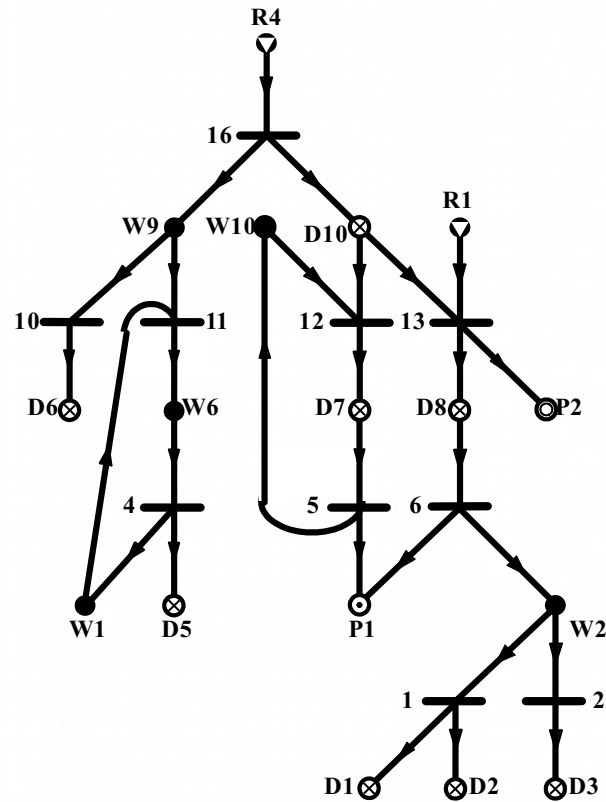
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- (SW1) Every **required product** is represented in the structure.
- (SW2) A vertex of the material type has no input if and only if it represents a raw material.
- (SW3) Every vertex of the operating unit type represents an operating unit defined in this synthesis problem.
- (SW4) Every vertex of the operating unit type has at least one path leading to a vertex of the material type representing a **required product**, a **potential product**, or a **disposable byproduct**.
- (SW5) If a vertex of the material-type belongs to the graph, it must represent an input to or output from at least one operating unit represented in the graph.
- (SW6) **A vertex of the material type has no output only if it represents a required product, a potential product, or a disposable byproduct.**

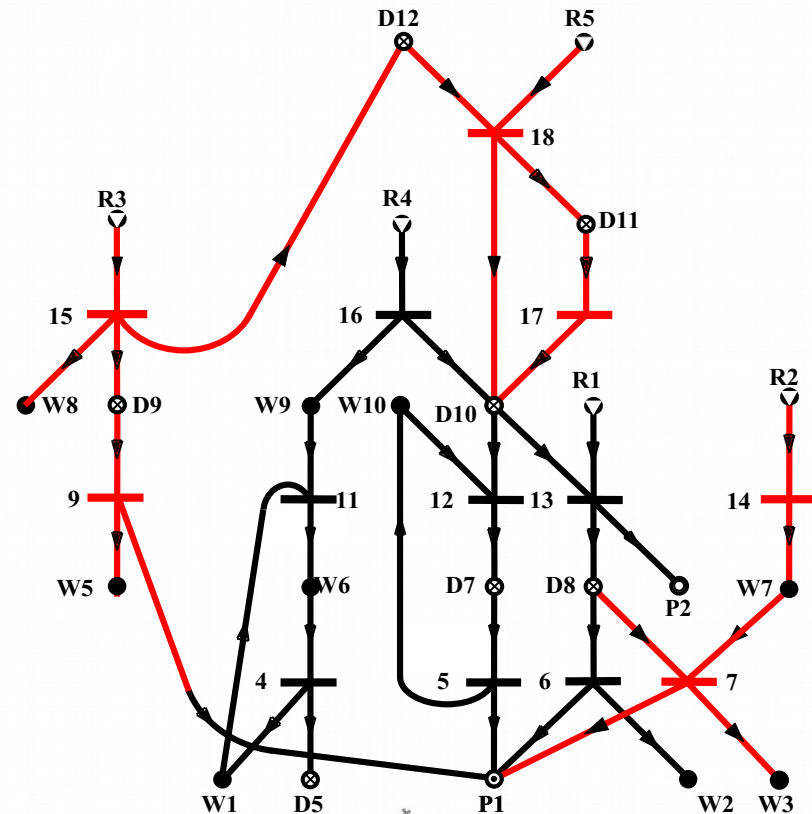


Waste Treatment

Maximal structure with waste treatment



Maximal structure without waste treatment



Publications on Waste Treatment

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és
hozzáférhetőségének együttes javítása
a Pannon Egyetemen

- Friedler, F., J. B. Varga, and L. T. Fan, Algorithmic Approach to the Integration of Total Flowsheet Synthesis and Waste Minimization, presented at the AIChE Summer National Meeting, Denver, CO, U.S.A., August 14-17, 1994.
- József Varga, Extensions of the Process-Network Synthesis Problem, PhD thesis, University of Veszprem, 2000



Process Synthesis Problems

Level of abstraction	Synthesis Problems						
<i>Macroscopic</i>	Conceptual Process Design 1990-						
<i>Mezoscopic</i>	Reaction Network Synthesis	Waste Treatment 1994-	Separation Network Synthesis 1993-	Heat Integration	Control Design	Reliability Analysis	Scheduling
<i>Microscopic</i>	Reaction Pathway Identification		Azeotropic Distillation		Stability Analysis		Time Constraints

Process Synthesis Problems

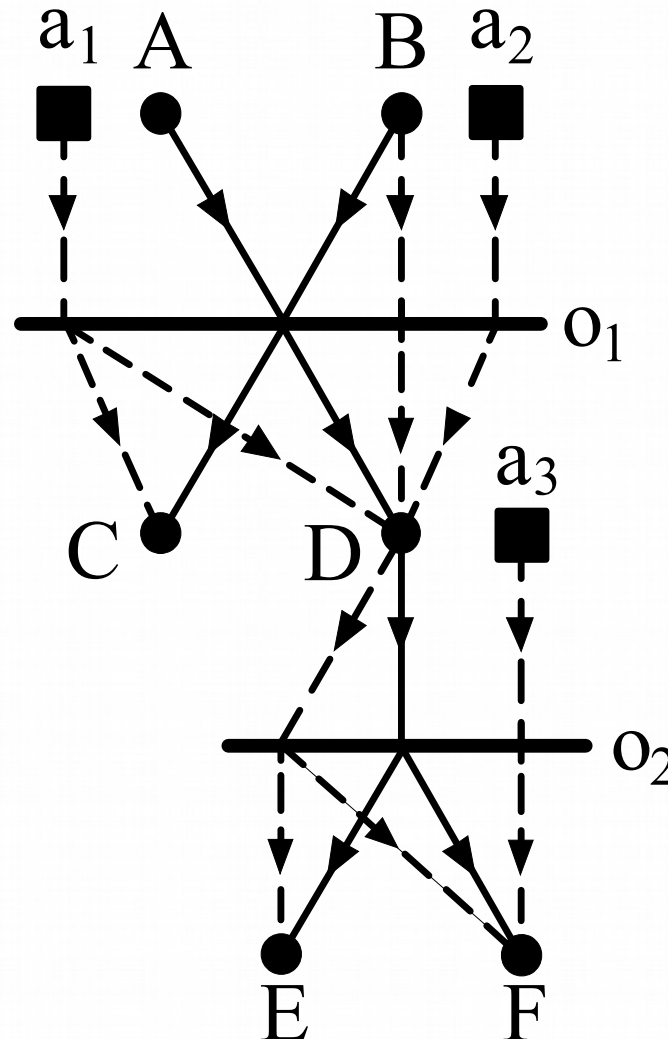
Level of abstraction	Synthesis Problems						
<i>Macroscopic</i>	Conceptual Process Design 1990-						
<i>Mezoscopic</i>	Reaction Network Synthesis	Waste Treatment 1994-	Separation Network Synthesis 1993-	Heat Integration	Control Design 1995-	Reliability Analysis	Scheduling
<i>Microscopic</i>	Reaction Pathway Identification		Azeotropic Distillation		Startability Analysis		Time Constraints

Structural Controllability: Representation

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

CP-graph



actuators: ■

Axioms of Structurally Controllable Process Structures

- S1 .. S5
- (SC1) For each material x , which is either a product or an intermediate produced and consumed, there exists an $a \in A$ actuator and an $[a, x]^C$ control path in the CP-graph of the structure.
- Definition: If b_1 is an actuator and b_1, b_2, \dots, b_m is a path in the control component of the CP-graph, then it is called **control path** and denoted by $[b_1, b_m]^C$.

Publications on Structural Controllability

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és
hozzáférhetőségének együttes javítása
a Pannon Egyetemen

- Hangos, K. M., J. B. Varga, F. Friedler, and L. T. Fan, Integrated Synthesis of a Process and Its Fault-Tolerant Control System, Computers Chem. Engng, 19, S465-470 (1995).
- József Varga, Extensions of the Process-Network Synthesis Problem, PhD thesis, University of Veszprem, 2000



Process Synthesis Problems

Level of abstraction	Synthesis Problems						
<i>Macroscopic</i>	Conceptual Process Design 1990-						
<i>Mezoscopic</i>	Reaction Network Synthesis	Waste Treatment 1994-	Separation Network Synthesis 1993-	Heat Integration	Control Design 1995-	Reliability Analysis	Scheduling
<i>Microscopic</i>	Reaction Pathway Identification		Azeotropic Distillation		Stability Analysis		Time Constraints

Process Synthesis Problems

Level of abstraction	Synthesis Problems						
<i>Macroscopic</i>	Conceptual Process Design 1990-						
<i>Mezoscopic</i>	Reaction Network Synthesis	Waste Treatment 1994-	Separation Network Synthesis 1993-	Heat Integration	Control Design 1995-	Reliability Analysis	Scheduling
<i>Microscopic</i>	Reaction Pathway Identification 1997-		Azeotropic Distillation		Startability Analysis		Time Constraints

P-GRAPH REPRESENTATION OF REACTION PATHWAYS

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

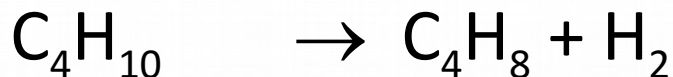
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Example:

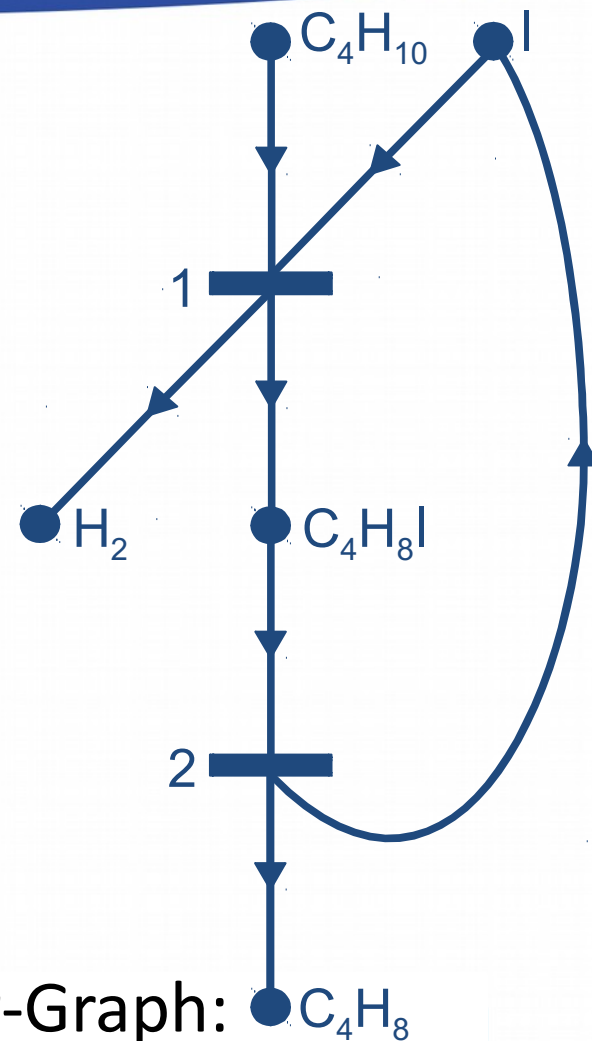
- Elementary reactions:



- Overall reaction:



Reaction pathway represented by P-Graph: $\bullet \text{C}_4\text{H}_8$



Axioms of Combinatorially Feasible Reaction Pathways

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- (T1) Every final product of the overall reaction is represented in the network.
- (T2) Every starting reactant of the overall reaction is represented in the network.
- (T3) Each reaction step represented in the network is defined a priori.
- (T4) Every species represented in the network has at least one path leading to a final product of the overall reaction.
- (T5) Every chemical or active species represented in the network must be a reactant for or a product from at least one reaction step represented in the network.
- (T6) The network includes at most either forward or reverse step of each elementary reaction represented in the network.
- (T7) A reactant of any elementary reaction represented in the reaction network is a starting reactant of the overall reaction, if it is not produced by any reaction step represented in the network.

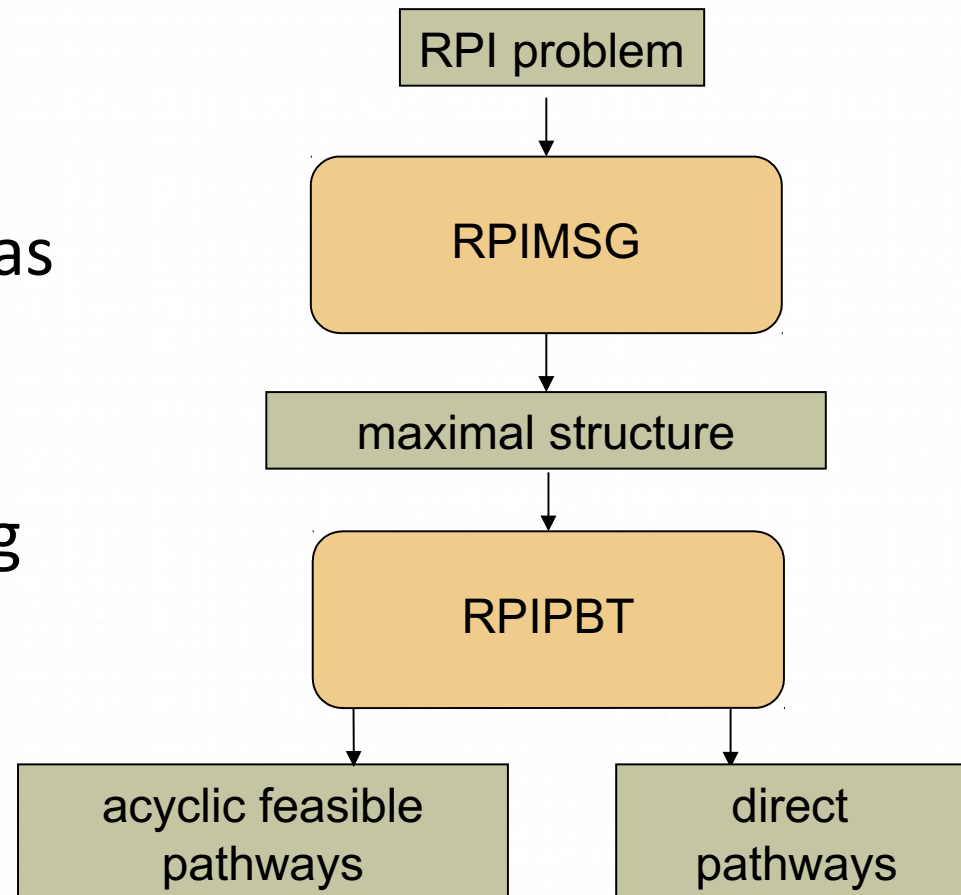
P-graph Framework: Algorithms (Cont'd)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Algorithm RPIPBT

- takes into account **combinatorial axioms** as well as elementary balances
- is capable of generating directly all **acyclic feasible pathways**
- optionally generates **direct pathways** only



Comparison of the Methodologies for Reaction Pathway Identification

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

	Convex Analysis	P-graph Approach: Algorithm RPIPBT
Generate direct pathways	✓	✓
Generate each direct pathway systematically without redundancy	✗	✓
Generate each acyclic feasible pathway systematically without redundancy	✗	✓
Combinatorially accelerated	✗	✓

Application to Fischer-Tropsch Synthesis Reaction: Problem Definition

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Overall reaction: $11 \text{ CO} + 19 \text{ H}_2 = \text{CH}_4 + 7 \text{ H}_2\text{O} + 2 \text{ CO}_2 + 2 \text{ C}_2\text{H}_6 + 2 \text{ C}_2\text{H}_4$

Elementary reactions:

s1[0,90.8]: $\text{CO} + \text{I} = \text{COI}$

s2[11.3,89.1]: $\text{H}_2 + 2 \text{ I} = 2 \text{ HI}$

s3[157.1,23.7]: $\text{COI} + \text{HI} = \text{Cl} + \text{OHI}$

s4[155.6,23.3]: $\text{Cl} + \text{HI} = \text{CHI} + \text{I}$

s5[50.5,102.7]: $\text{CHI} + \text{HI} = \text{CH}_2\text{I} + \text{I}$

s6[20.7,109.1]: $\text{CH}_2\text{I} + \text{HI} = \text{CH}_3\text{I} + \text{I}$

s7[30.8,63.9]: $\text{CH}_3\text{I} + \text{HI} = \text{CH}_4 + 2 \text{ I}$

s8[38.6,89.6]: $\text{OHI} + \text{HI} = \text{H}_2\text{OI} + \text{I}$

s9[70,0]: $\text{H}_2\text{OI} = \text{H}_2\text{O} + \text{I}$

s10[118.9,0]: $\text{COI} + \text{HI} = \text{CHOI} + \text{I}$

s11[12,84.4]: $\text{CHOI} + \text{HI} = \text{CH}_2\text{OI} + \text{I}$

s12[43.8,36.8]: $\text{CH}_2\text{OI} + \text{HI} = \text{CH}_3\text{OI} + \text{I}$

s13[65.48,1]: $\text{CH}_3\text{OI} + \text{I} = \text{CH}_3\text{I} + \text{OI}$

s14[55.4,28.1]: $\text{OI} + \text{HI} = \text{OHI} + \text{I}$

s15[67.1,47.7]: $\text{COI} + \text{OI} = \text{CO}_2\text{I}_2$

s16[27.7,0]: $\text{CO}_2\text{I}_2 = \text{CO}_2 + 2 \text{ I}$

s17[0,157.2]: $\text{CH}_3\text{I} + \text{CH}_2\text{I} = \text{CH}_3\text{CH}_2\text{I} + \text{I}$

s18[1,64.6]: $\text{CH}_3\text{I} + \text{CH}_2\text{OI} = \text{CH}_3\text{CH}_2\text{OI} + \text{I}$

s19[38,18.3]: $\text{CH}_3\text{I} + \text{COI} = \text{CH}_3\text{COI} + \text{I}$

s20[38.5,58.2]: $\text{CH}_3\text{COI} + \text{HI} = \text{CH}_3\text{CHOI} + \text{I}$

s21[18.9,26.1]: $\text{CH}_3\text{CHOI} + \text{HI} = \text{CH}_3\text{CH}_2\text{OI} + \text{I}$

s22[63.7,45.9]: $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OI} + \text{I} = \text{CH}_3\text{CH}_2\text{I} + \text{OI}$

s23[29.1,65.9]: $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{I} + \text{HI} = \text{CH}_3\text{CH}_3\text{I}_2$

s24[25.1,10.8]: $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{I} + 2 \text{ I} = \text{CH}_2\text{CH}_2\text{I}_2 + \text{HI}$

s25[32.6,0]: $\text{CH}_3\text{CH}_3\text{I}_2 = \text{C}_2\text{H}_6 + 2 \text{ I}$

s26[41.8,0]: $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{I}_2 = \text{C}_2\text{H}_4 + 2 \text{ I}$



Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Application to Fischer-Tropsch Synthesis Reaction: Computational Results

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- Generating Direct pathways by algorithm RPIPBT
 - Structures in the search space: $3^{26}-1 =$

2.541.865.828.329

Reduction by the P-graph approach: 1:10 Billion

- Combinatorially feasible pathways:
by algorithm RPISSG in
- Acyclic feasible pathways:
by algorithm RPIPBT in
- Direct pathways:
by algorithm RPIPBT in
- Most energetically favorable pathways:
by algorithm RPIPBT in

661

14.3 s*

143

2.3 s*

24

1.5 s*

5

0.4 s*

*Intel Pentium-M 1.8 GHz notebook



Publications on Reaction Pathway Identification

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és
hozzáférhetőségének együttes javítása
a Pannon Egyetemen

- Fan, L. T. and F. Friedler, Reaction Pathway Analysis by a Network Synthesis Technique, presented at the AIChE Annual Meeting, Los Angeles, CA, U.S.A., November 16-21, 1997.
- Fan, L. T., B. Bertok, and F. Friedler, Combinatorial Framework for the Systematic Generation of Reaction Pathways, presented at the AIChE Annual Meeting, Dallas, TX, U.S.A., October 31 - November 5, 1999.
- Fan, L. T., B. Bertok, and F. Friedler, A Graph-Theoretic Method to Identify Candidate Mechanisms for Deriving the Rate Law of a Catalytic Reaction, Computers and Chemistry, 26, 265-292 (2002).

Process Synthesis Problems

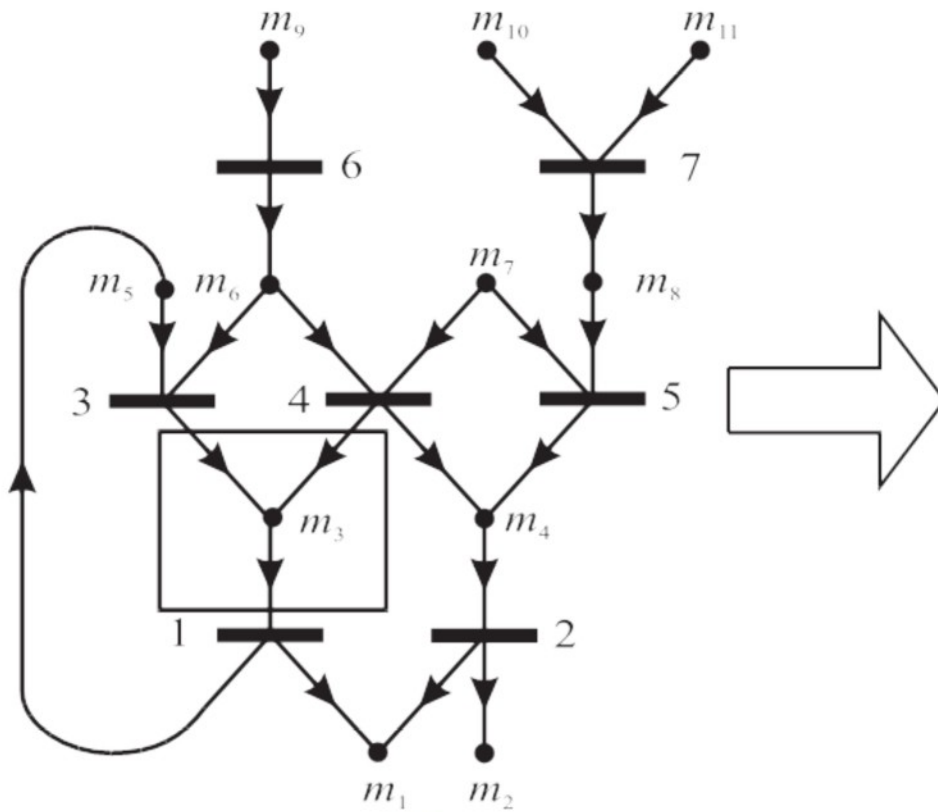
Level of abstraction	Synthesis Problems						
<i>Macroscopic</i>	Conceptual Process Design 1990-						
<i>Mezoscopic</i>	Reaction Network Synthesis	Waste Treatment 1994-	Separation Network Synthesis 1993-	Heat Integration	Control Design 1995-	Reliability Analysis	Scheduling
<i>Microscopic</i>	Reaction Pathway Identification 1997-		Azeotropic Distillation		Startability Analysis		Time Constraints

Process Synthesis Problems

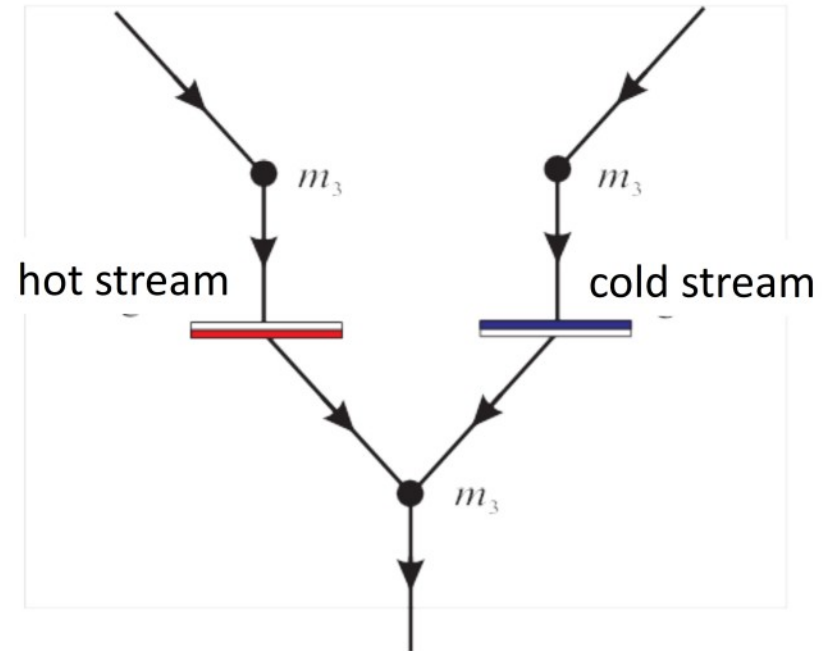
Level of abstraction	Synthesis Problems						
<i>Macroscopic</i>	Conceptual Process Design 1990-						
<i>Mezoscopic</i>	Reaction Network Synthesis	Waste Treatment 1994-	Separation Network Synthesis 1993-	Heat Integration 1999-	Control Design 1995-	Reliability Analysis	Scheduling
<i>Microscopic</i>	Reaction Pathway Identification 1997-		Azeotropic Distillation		Startability Analysis		Time Constraints

Heat Integration: Representation

P-graph



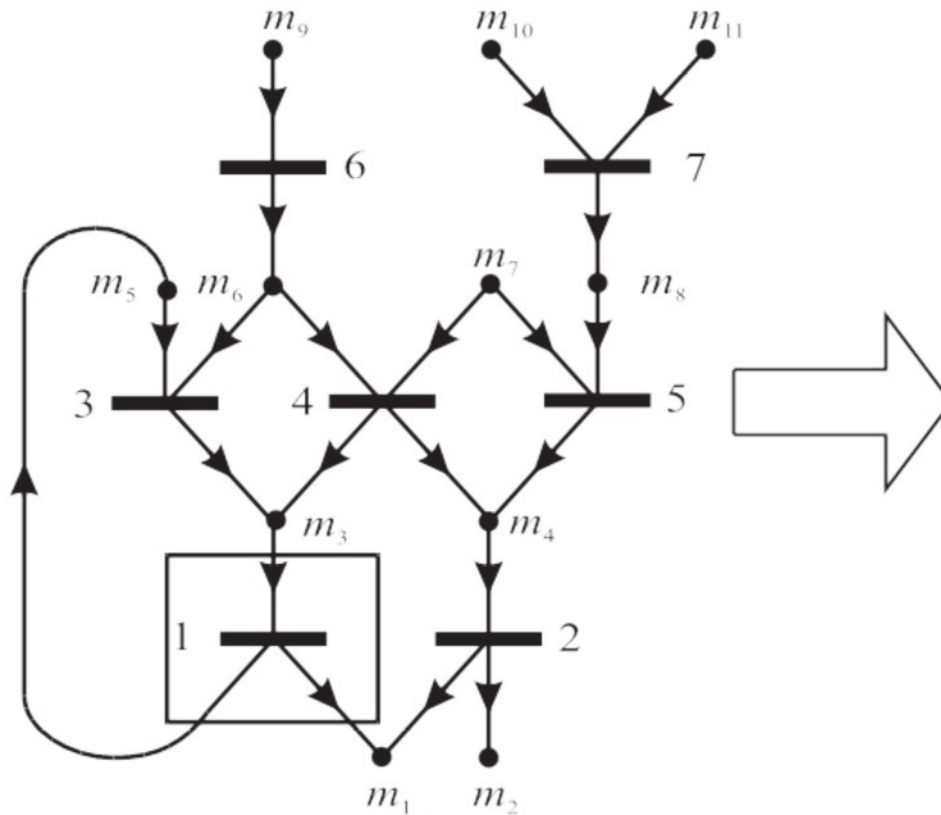
hP-graph



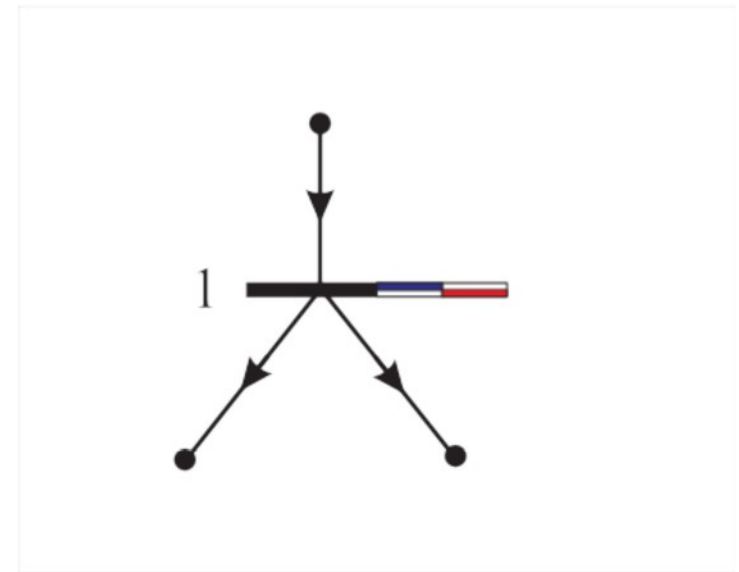
Heat Integration: Representation

Latent heat

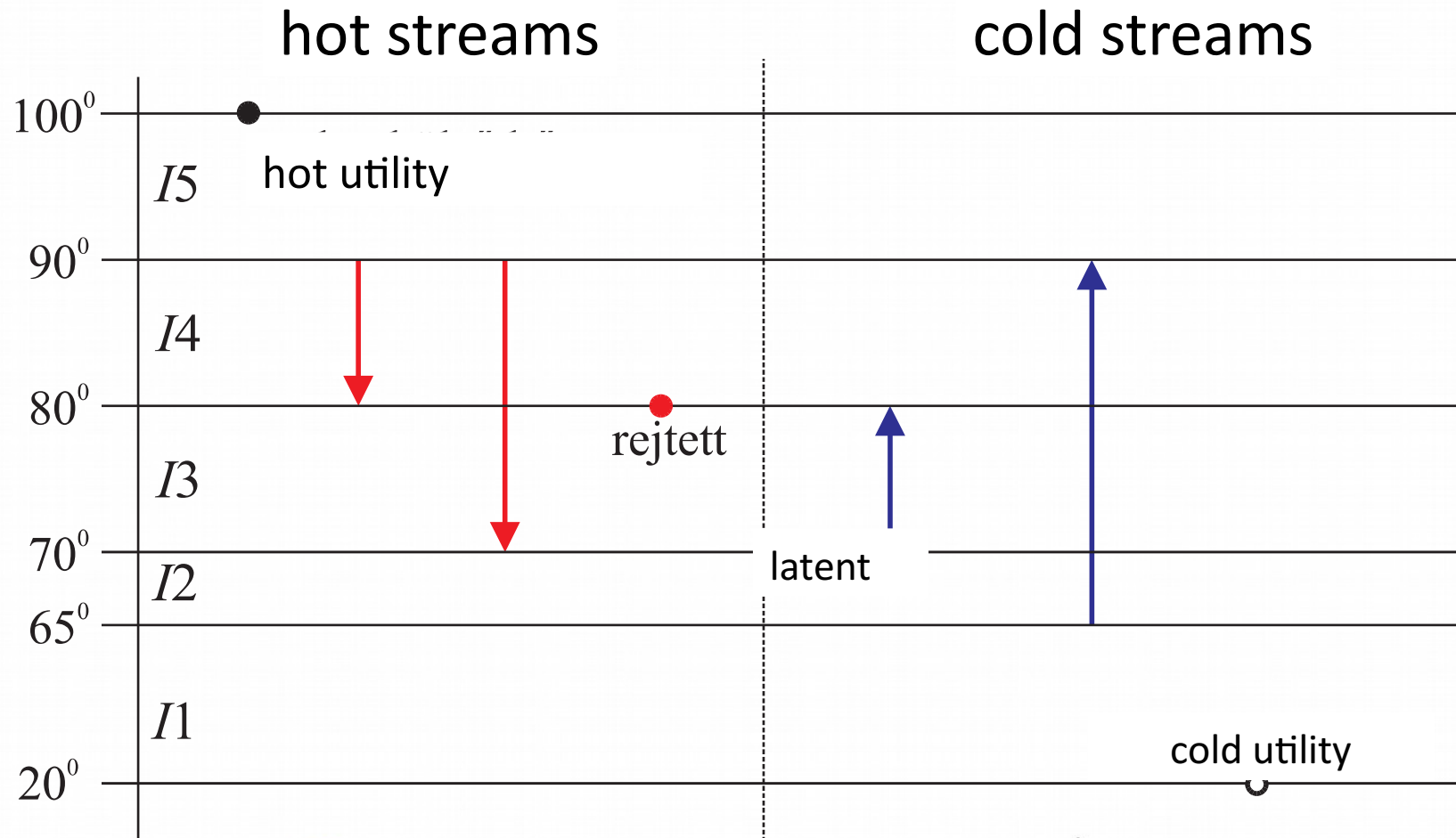
P-graph



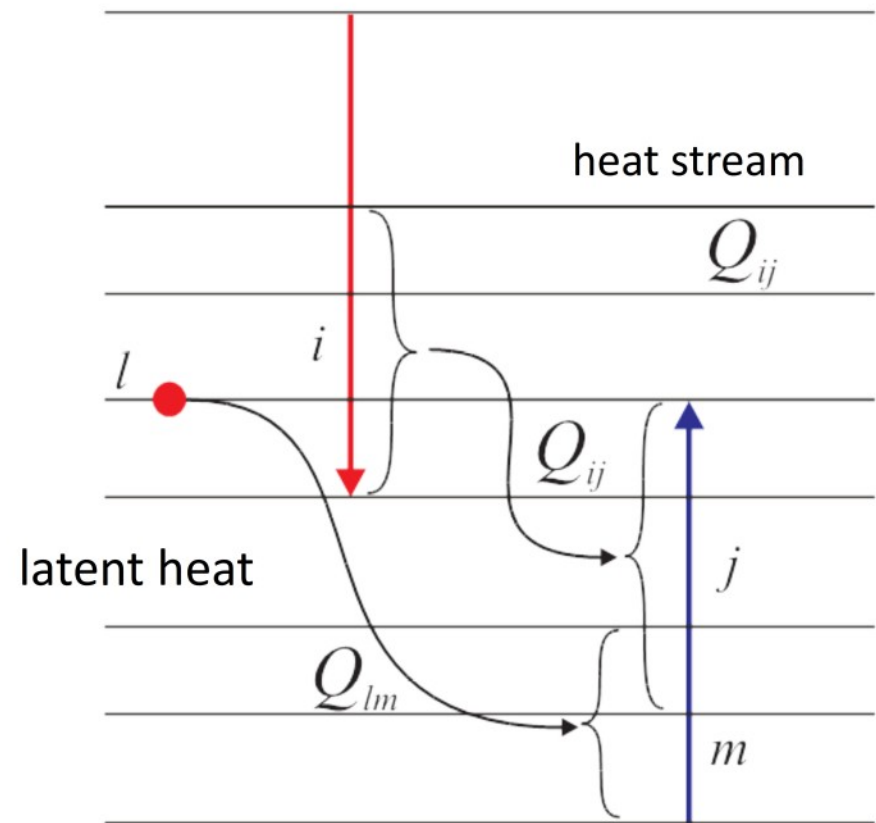
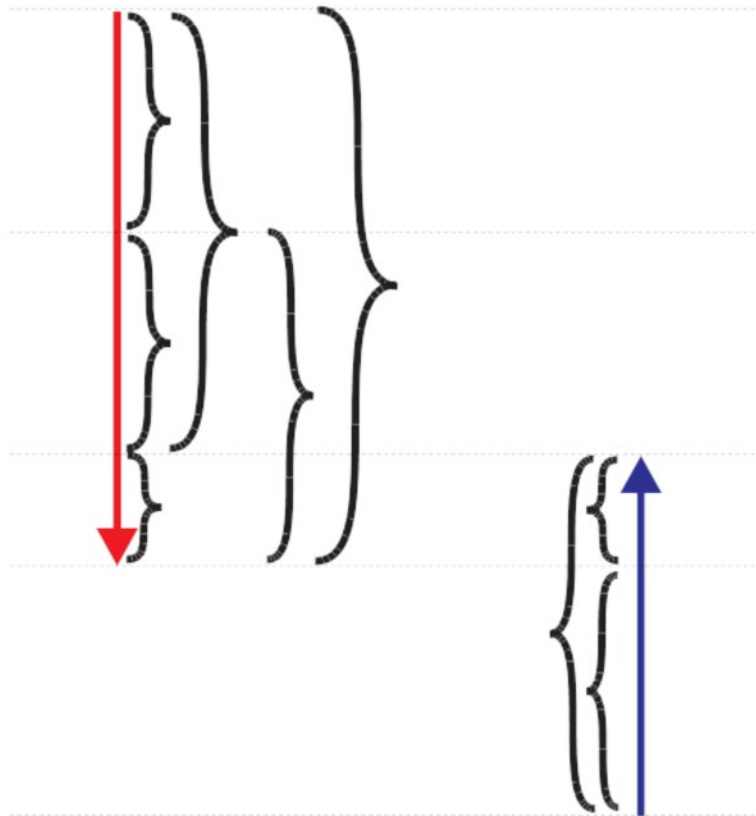
hP-graph



Heat Integration: Head demands



Heat Integration: Heat Exchange between Heat Intervals



Publications on Heat Integration

- Nagy, A. B., L. Halasz, F. Friedler, and L. T. Fan, Integrated Synthesis of Process and Heat Exchanger Networks: Algorithmic Approach, presented at the PRES'99, Budapest, Hungary, May 31-June 2, 1999.
- Nagy, A. B., R. Adonyi, L. Halasz, F. Friedler, and L. T. Fan, Integrated Synthesis of Process and Heat Exchanger Networks: Algorithmic Approach, Applied Thermal Engineering, 21 (2001), 1407-1427.
- Biros, G., F. Friedler, J. Romero, and L. Puigjaner, Multi-Objective Optimization in Batch Process Scheduling, presented at the 53rd Canadian Chemical Engineering (CSCHE2003/PRES 2003) Conference in Hamilton, Ontario, Canada October 26-29, 2003.

Process Synthesis Problems

Level of abstraction	Synthesis Problems						
<i>Macroscopic</i>	Conceptual Process Design 1990-						
<i>Mezoscopic</i>	Reaction Network Synthesis	Waste Treatment 1994-	Separation Network Synthesis 1993-	Heat Integration 1999-	Control Design 1995-	Reliability Analysis	Scheduling
<i>Microscopic</i>	Reaction Pathway Identification 1997-		Azeotropic Distillation		Startability Analysis		Time Constraints

Process Synthesis Problems

Level of abstraction	Synthesis Problems						
<i>Macroscopic</i>	Conceptual Process Design 1990-						
<i>Mezoscopic</i>	Reaction Network Synthesis	Waste Treatment 1994-	Separation Network Synthesis 1993-	Heat Integration 1999-	Control Design 1995-	Reliability Analysis	Scheduling
<i>Microscopic</i>	Reaction Pathway Identification 1997-		Azeotropic Distillation 2000-		Startability Analysis	Time Constraints	

Azeotropic Distillation: Problem Formulation

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

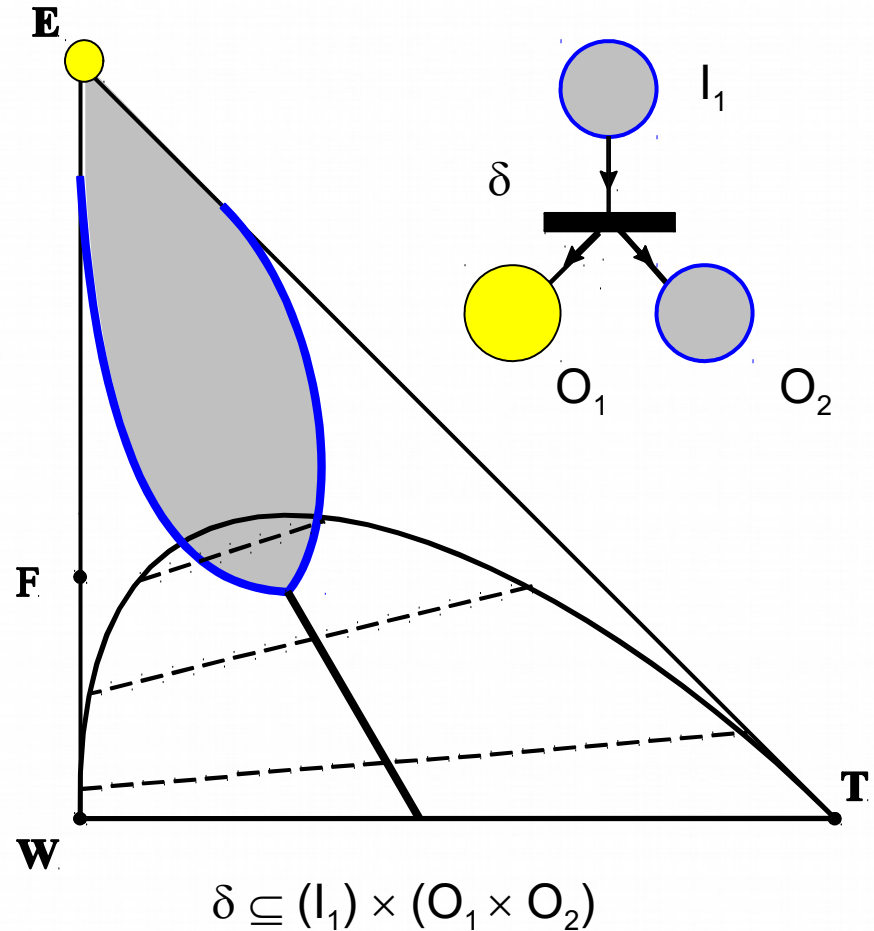
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- Model of inputs and outputs of the operations

Feasible regions derived from the analysis of RCM (Feng *et al.*, 2000)

- Models of operations

Defined by the regions representing their feasible inputs and outputs

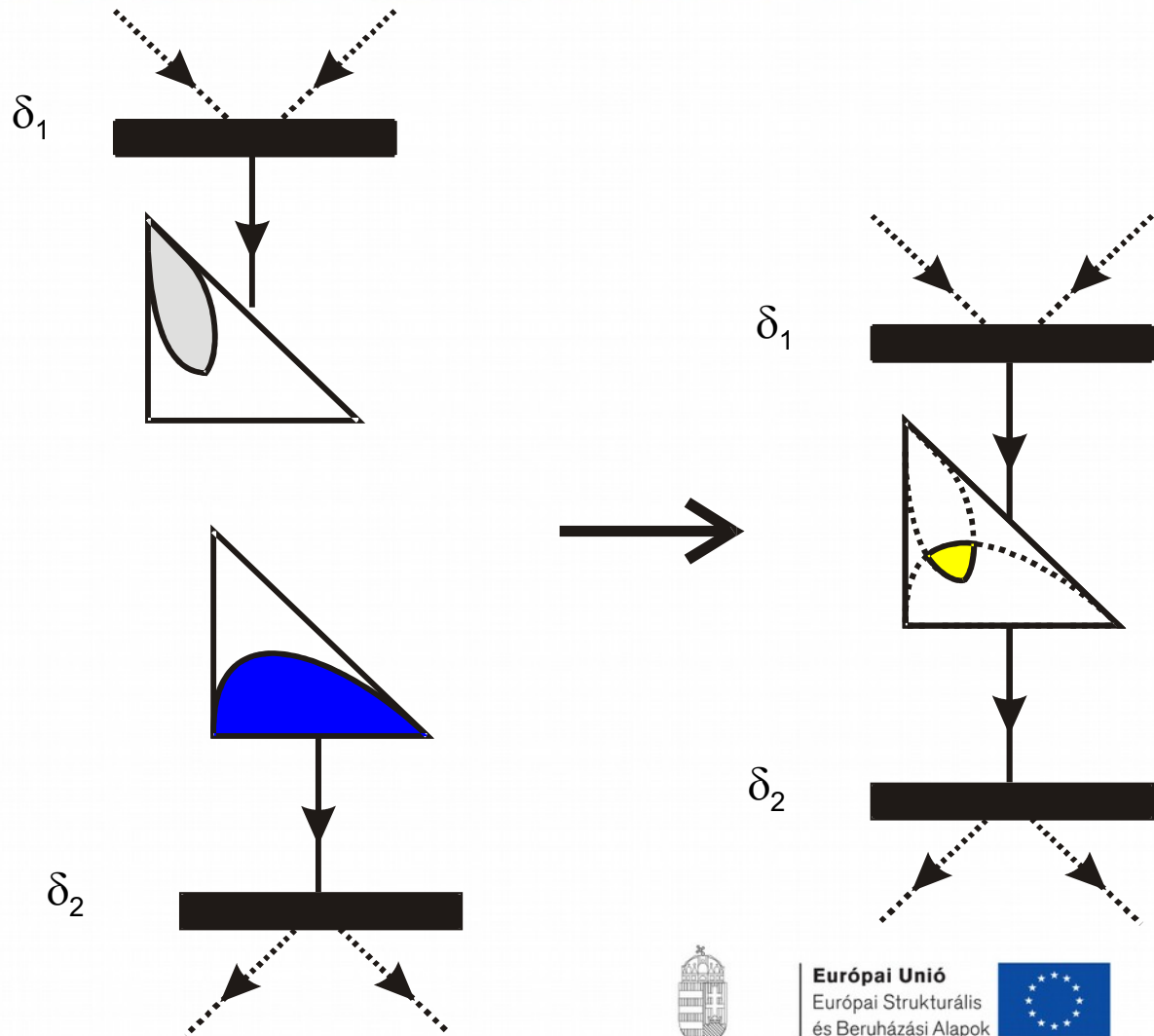


Azeotropic Distillation: Connecting Operations

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Two operations δ_1 and δ_2 can be connected, if there exists a feasible output from operation δ_1 , which is a feasible input to operation δ_2 .

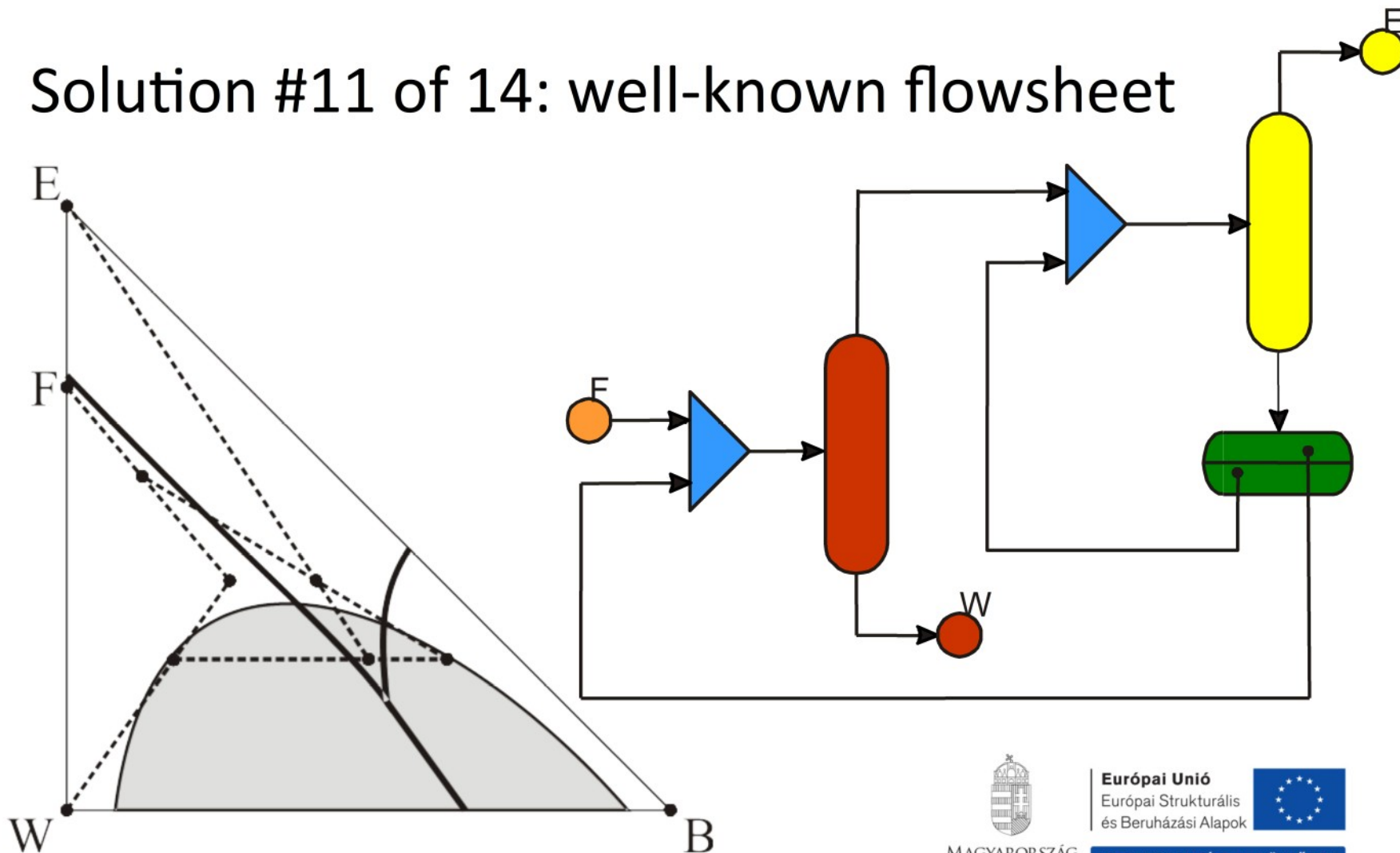


Application: Production of Pure Ethanol

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Solution #11 of 14: well-known flowsheet

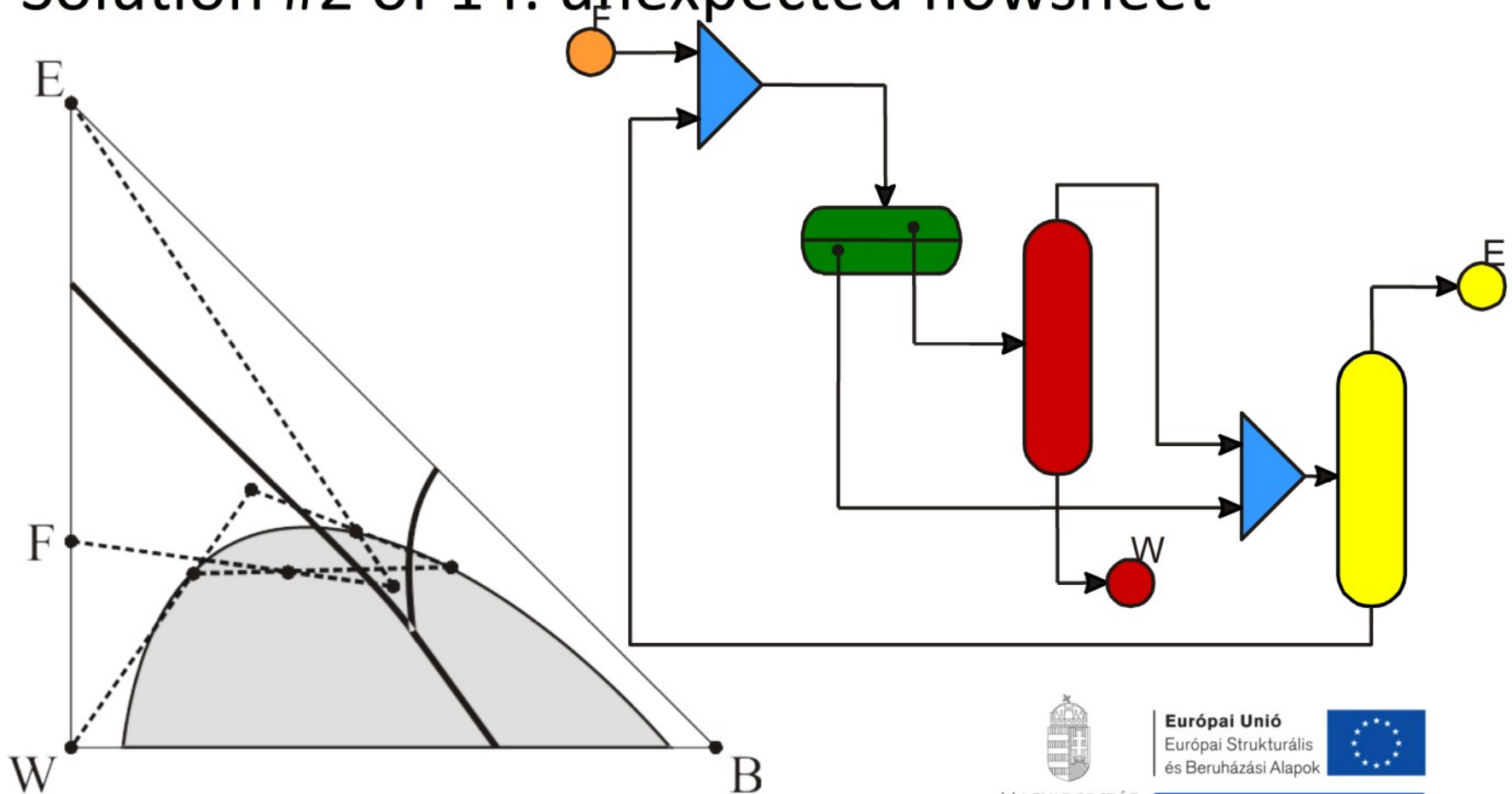


Application: Production of Pure Ethanol (Cont'd.)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és
hozzáférhetőségének együttes javítása
a Pannon Egyetemen

Solution #2 of 14: unexpected flowsheet



Publications on Azeotropic Distillation

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és
hozzáférhetőségének együttes javítása
a Pannon Egyetemen

- Feng, G., L. T. Fan, B. Bertok, L. Kalotai, and F. Friedler, A Graph-Theoretic Approach to the Algorithmic Synthesis of Azeotropic-Distillation Systems, presented at the AIChE Spring National Meeting, Atlanta, GA, U.S.A., March 5-9, 2000.
- Feng, G., L. T. Fan, P. A. Seib, B. Bertok, L. Kalotai, and F. Friedler, A Graph-Theoretic Method for the Algorithmic Synthesis of Azeotropic-Distillation Systems, Ind. Eng. Chem. Res., 42, 3602-3611 (2003).

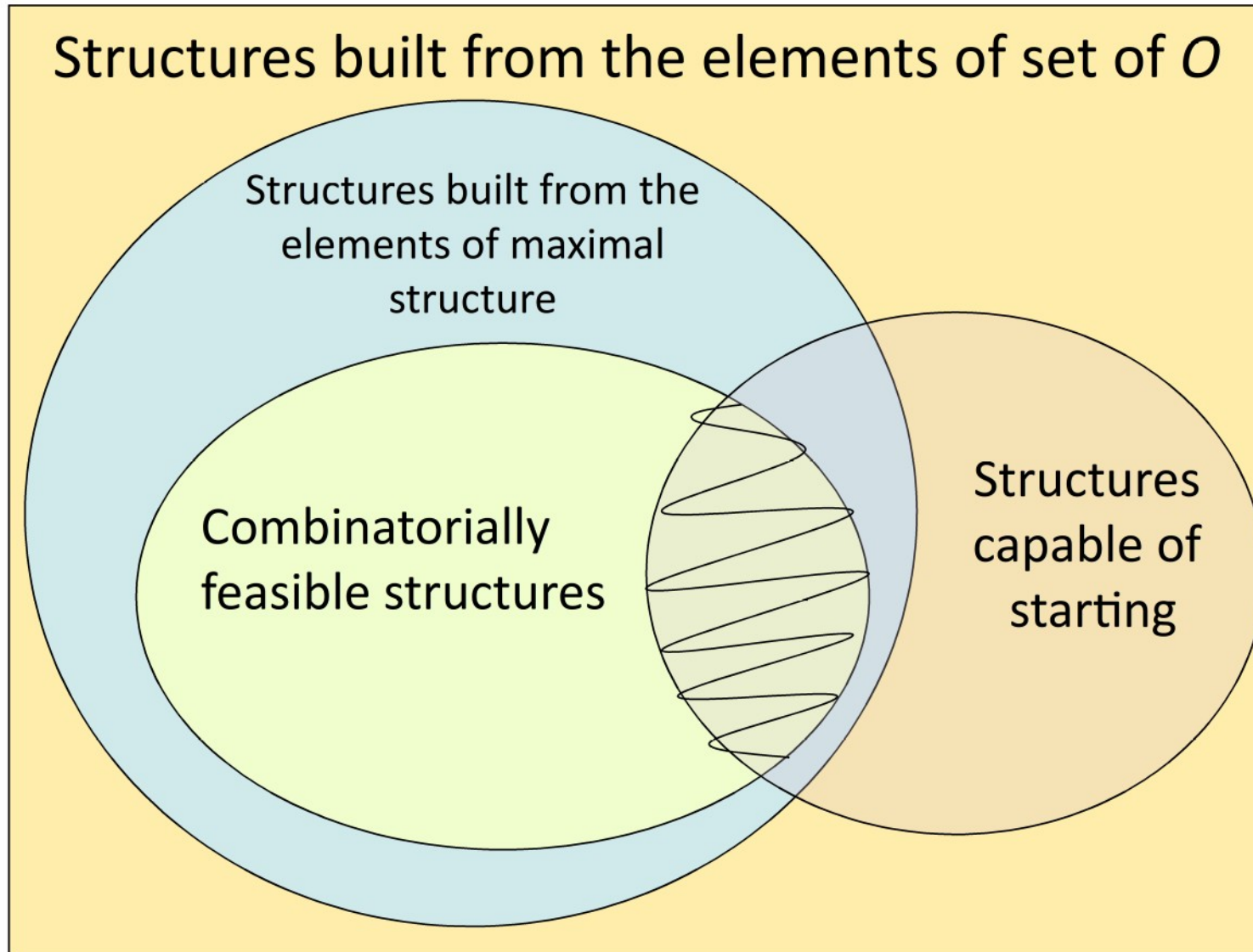
Process Synthesis Problems

Level of abstraction	Synthesis Problems						
<i>Macroscopic</i>	Conceptual Process Design 1990-						
<i>Mezoscopic</i>	Reaction Network Synthesis	Waste Treatment 1994-	Separation Network Synthesis 1993-	Heat Integration 1999-	Control Design 1995-	Reliability Analysis	Scheduling
<i>Microscopic</i>	Reaction Pathway Identification 1997-		Azeotropic Distillation 2000-		Stability Analysis		Time Constraints

Process Synthesis Problems

Level of abstraction	Synthesis Problems						
<i>Macroscopic</i>	Conceptual Process Design 1990-						
<i>Mezoscopic</i>	Reaction Network Synthesis	Waste Treatment 1994-	Separation Network Synthesis 1993-	Heat Integration 1999-	Control Design 1995-	Reliability Analysis	Scheduling
<i>Microscopic</i>	Reaction Pathway Identification 1997-		Azeotropic Distillation 2000-		Startability Analysis 2003-		Time Constraints

Startable Process Structures



Algorithm Checking the Structural Startability

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

begin

repeat

1. step $e = o \setminus \varphi^+(m \setminus a)$;

2. step $ap = \psi^+(e) \setminus a$;

3. step $a = a \cup ap$;

until $ap = 0$

if ($e \neq o$)

return false;

//not capable of starting

else

return true; //capable of

starting

end.

Input:

an (m, o) P-Graph and the set of $a \subseteq M$ chemical species defined to be available in the beginning

Output:

logical answer, whether

(m, o) is capable of starting

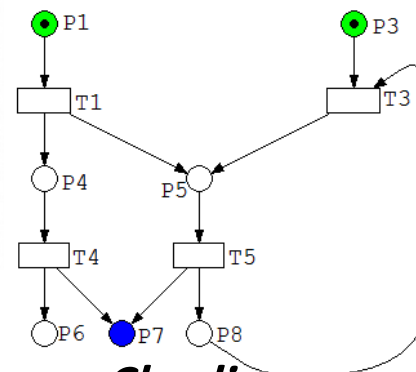
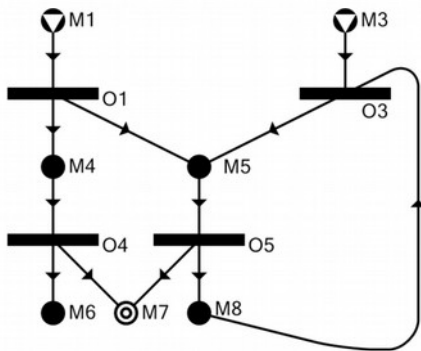
e - set of elementary reaction steps which are capable of starting

ap – set of chemical species recently produced

P-graphs and Petri nets: Similarities

- Structural representation: bipartite directed graphs
- Natural correspondences between the specific terms:

P-graph	Petri net
operating units	transitions
materials	places
raw materials	places without input transitions (source places)
products	places without output transitions (sink places)
intermediates	places with both input and output transitions



*Petri net figures are created by software **Snoopy, Charlie***

P-graphs and Petri nets: Differences

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- P-graph framework
 - Effective algorithms to synthesize optimal process systems constructed from potential building blocks
 - Computes both the optimal structure and the optimal parameter values of a process system
 - No information on the dynamics of the system
- Petri nets
 - Tools for simulation and analysis of complex systems' dynamic behavior
 - Model the operation of preliminarily defined process network
 - Inappropriate for synthesizing the optimal process structure

Publications on Startability

- S. Gyapay and A. Pataricza, “A combination of Petri nets and Process Network Synthesis,” in Proc of the 2003 IEEE International Conference on Systems, Man & Cybernetics, pp. 1167–1174, IEEE Press, Washington, D.C., USA, October 5-8 2003.
- Nagy, Z., B. Bertok, F. Friedler, D.-Y. Lee, L. T. Fan, and S. Shafie, Exploring Mechanisms Leading to Robust Biochemical Systems, presented at the PRES 2006, Praha, Czech Republic, August 27-31, 2006.
- Lakner, R., B. Bertók, F. Friedler. Synthesis of startable reaction pathways. Chemical Engineering Transactions, 70, 1129-1134, 2018.

Process Synthesis Problems

Level of abstraction	Synthesis Problems						
<i>Macroscopic</i>	Conceptual Process Design 1990-						
<i>Mezoscopic</i>	Reaction Network Synthesis	Waste Treatment 1994-	Separation Network Synthesis 1993-	Heat Integration 1999-	Control Design 1995-	Reliability Analysis	Scheduling
<i>Microscopic</i>	Reaction Pathway Identification 1997-		Azeotropic Distillation 2000-		Startability Analysis 2003-		Time Constraints

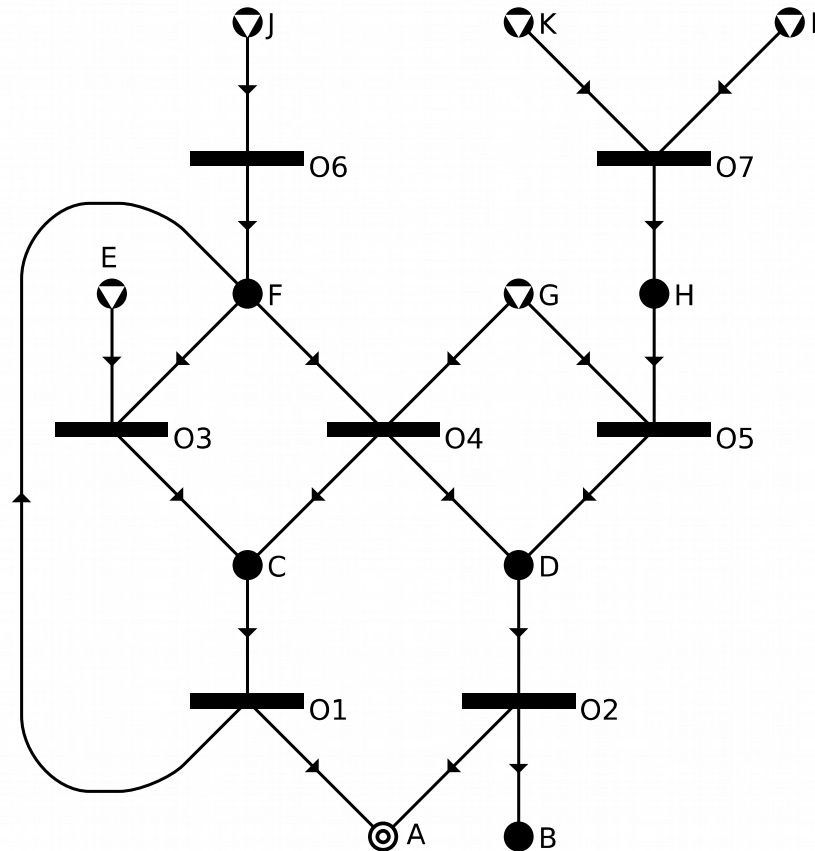
Process Synthesis Problems

Level of abstraction	Synthesis Problems						
<i>Macroscopic</i>	Conceptual Process Design 1990-						
<i>Mezoscopic</i>	Reaction Network Synthesis	Waste Treatment 1994-	Separation Network Synthesis 1993-	Heat Integration 1999-	Control Design 1995-	Reliability Analysis 2008-	Scheduling
<i>Microscopic</i>	Reaction Pathway Identification 1997 -		Azeotropic Distillation 2000-		Stability Analysis 2003-		Time Constraints

Computation of Structural Reliability

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

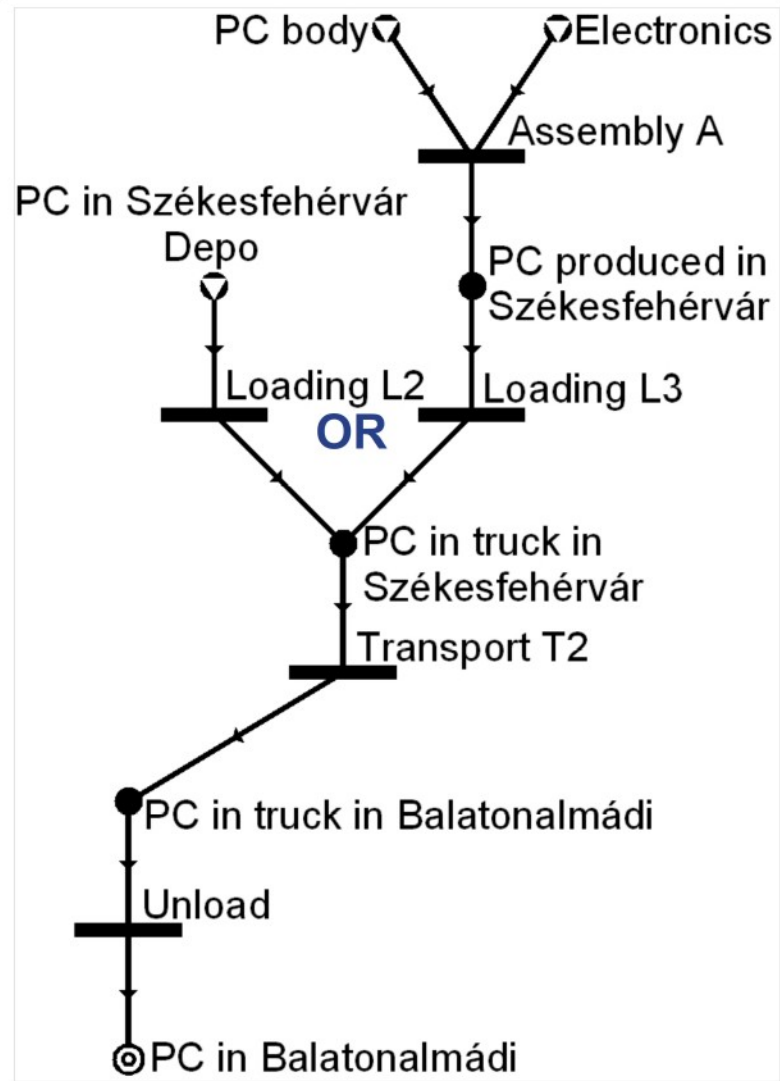
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



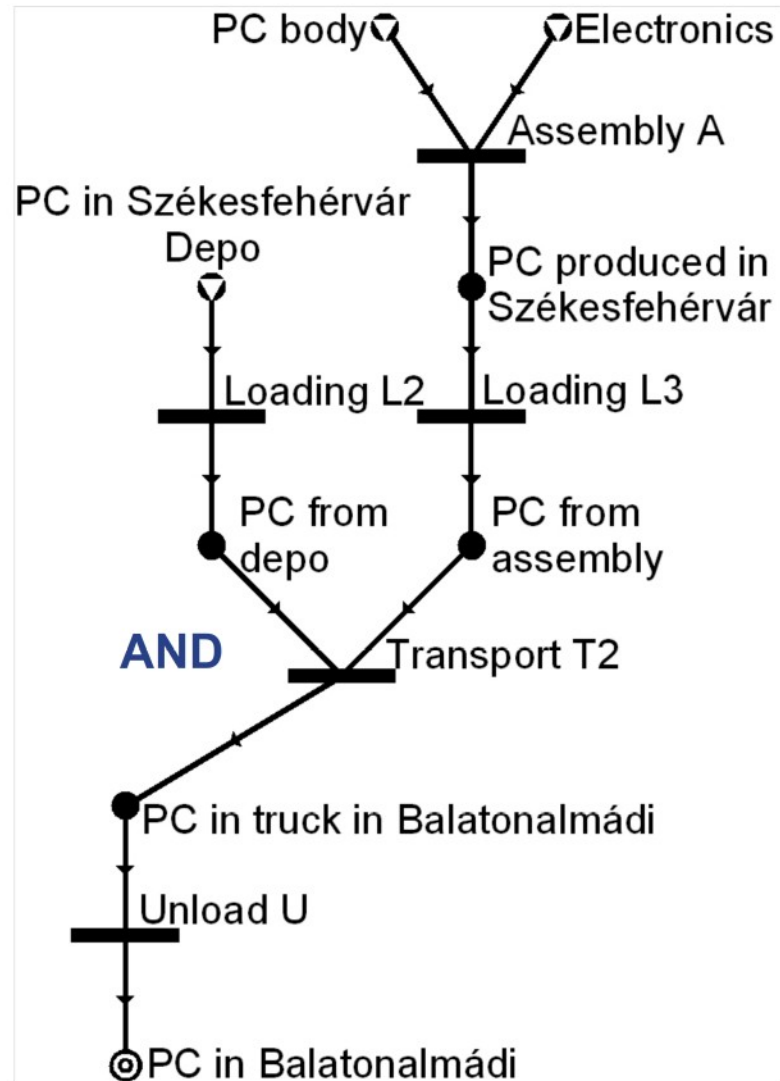
$$\begin{aligned}
 &P1 * P3 + P1 * P4 - P1 * P3 * P4 + P2 * P4 * P6 - P1 * P2 * P4 * P6 + P2 * P5 * P7 - \\
 &P1 * P2 * P3 * P5 * P7 - P1 * P2 * P4 * P5 * P7 + P1 * P2 * P3 * P4 * P5 * P7 - \\
 &P2 * P4 * P5 * P6 * P7 + P1 * P2 * P4 * P5 * P6 * P7
 \end{aligned}$$

Injecting Redundancy in Process Structures

Without redundancy



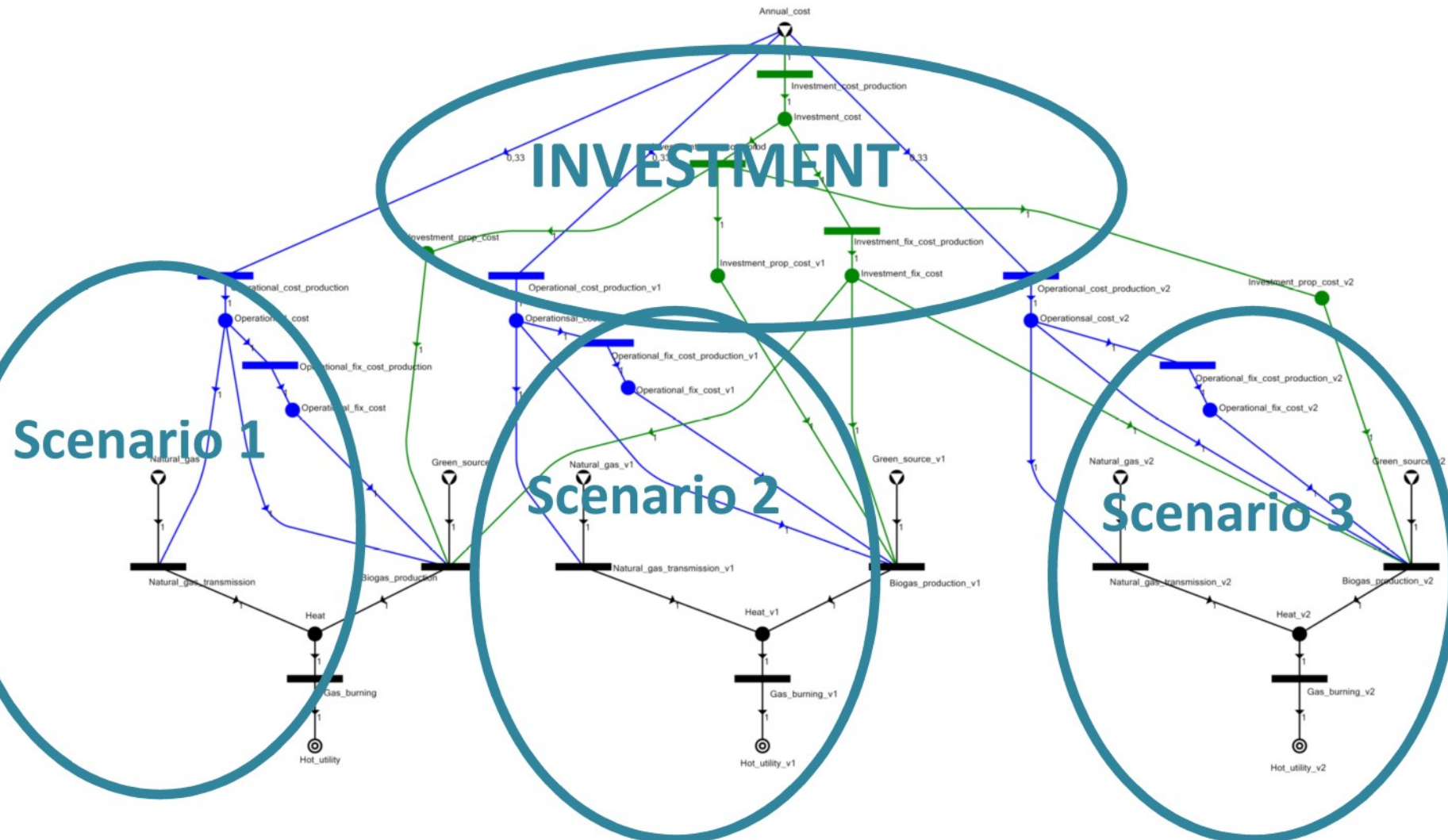
With redundancy



Structural Reliability: Expected Profit Based on Scenarios

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Publications on Process Reliability

- Kovács, Z., L.T. Fan, F. Friedler, Folyamathálózatok megbízhatósága, XXX. Magyar Operációkutatási Konferencia, Balatonöszöd, 2013.
- Bertok, B., K. Kalauz, Z. Sule, and F. Friedler, Combinatorial Algorithm for Synthesizing Redundant Structures to Increase Reliability of Supply Chains: Application to Biodiesel Supply, Industrial & Engineering Chemistry Research, 52(1), 181-186 (2013).
- Kovacs, Z., A. Orosz, F. Friedler, Synthesis algorithms for the reliability analysis of processing systems, Central European Journal of Operations Research, 27(2), 573-95
- Konig, E. and Bertok, B., 2019. Process graph approach for two-stage decision making: Transportation contracts. Computers & Chemical Engineering, 121, 1-11 (2019)

Process Synthesis Problems

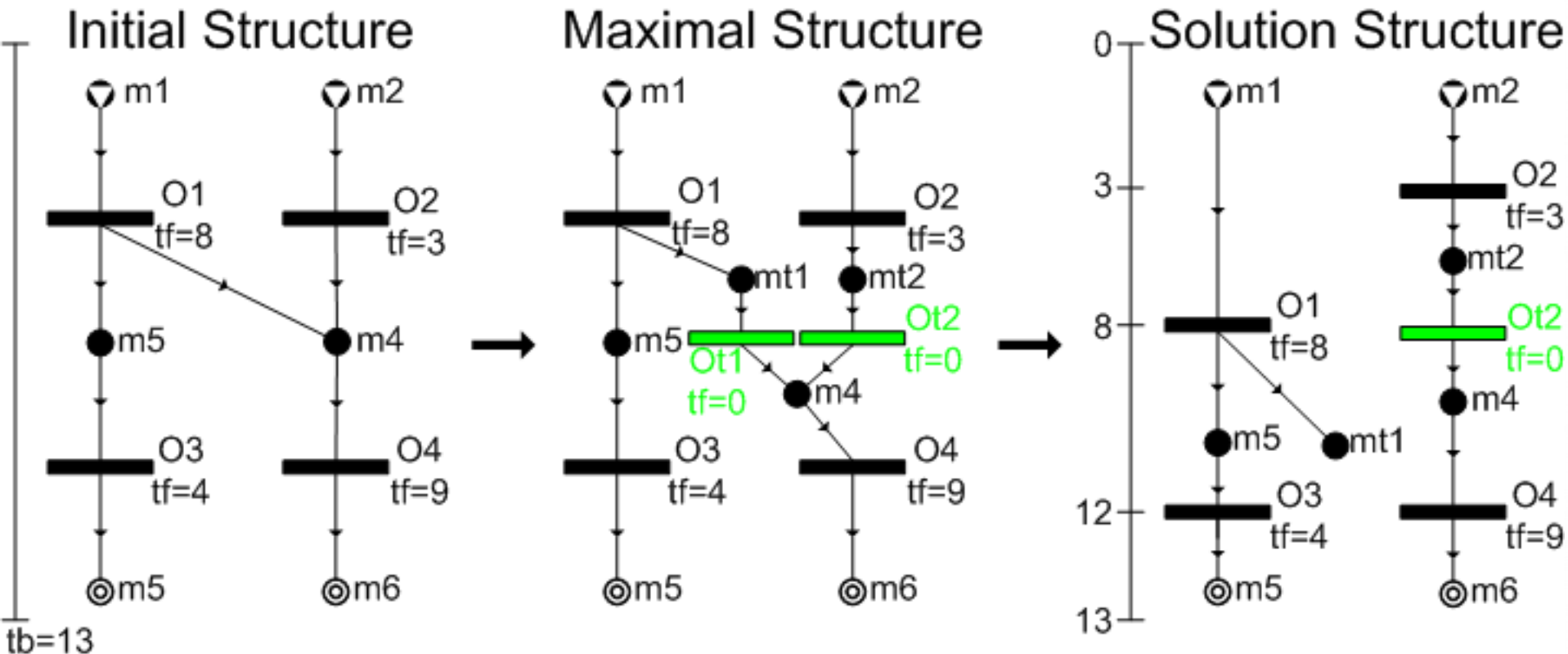
Level of abstraction	Synthesis Problems						
<i>Macroscopic</i>	Conceptual Process Design 1990-						
<i>Mezoscopic</i>	Reaction Network Synthesis	Waste Treatment 1994-	Separation Network Synthesis 1993-	Heat Integration 1999-	Control Design 1995-	Reliability Analysis 2008-	Scheduling
<i>Microscopic</i>	Reaction Pathway Identification 1997-		Azeotropic Distillation 2000-		Stability Analysis 2003-		Time Constraints

Process Synthesis Problems

Level of abstraction	Synthesis Problems						
<i>Macroscopic</i>	Conceptual Process Design 1990-						
<i>Mezoscopic</i>	Reaction Network Synthesis	Waste Treatment 1994-	Separation Network Synthesis 1993-	Heat Integration 1999-	Control Design 1995-	Reliability Analysis 2008-	Scheduling
<i>Microscopic</i>	Reaction Pathway Identification 1997-		Azeotropic Distillation 2000-		Startability Analysis 2003-		Time Constraints 2010-

Extension of the Maximal Structure

Include **operating units** to clarify precedence



Relaxed Model of TCPNS

$$tb = \max_{m_j \in P} \{U t_j\}$$

$$\forall o_i = (\alpha_i, \beta_i) \in o, \forall m_j \in \beta_i :$$

$$t_{m_j} \geq t_{o_i} + x_i * tp_i + y_i * (tb + tf_i) - tb$$

$$y_i = 0$$

$$y_i = 1$$

$$t_{m_j} \geq t_{o_i} - tb$$

$$t_{m_j} \geq t_{o_i} + x_i * tp_i + tf_i$$

Process Synthesis Problems

Level of abstraction	Synthesis Problems						
<i>Macroscopic</i>	Conceptual Process Design 1990-						
<i>Mezoscopic</i>	Reaction Network Synthesis	Waste Treatment 1994-	Separation Network Synthesis 1993-	Heat Integration 1999-	Control Design 1995-	Reliability Analysis 2008-	Scheduling
<i>Microscopic</i>	Reaction Pathway Identification 1997-		Azeotropic Distillation 2000-		Startability Analysis 2003-		Time Constraints 2010-

Process Synthesis Problems

Level of abstraction	Synthesis Problems						
<i>Macroscopic</i>	Conceptual Process Design 1990-						
<i>Mezoscopic</i>	Reaction Network Synthesis	Waste Treatment 1994-	Separation Network Synthesis 1993-	Heat Integration 1999-	Control Design 1995-	Reliability Analysis 2008-	Scheduling 2013-
<i>Microscopic</i>	Reaction Pathway Identification 1997-		Azeotropic Distillation 2000-		Startability Analysis 2003-		Time Constraints 2010-

Solving Scheduling Problem by TCPNS

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- **Automatic model generation** for
 - Unlimited Intermediate Storage (UIS),
 - No Intermediate Storage (NIS) and
 - Zero Wait (ZW)scheduling problems.
- Resources: Equipments
- Operating units:
 - Execution of tasks
 - Changeovers

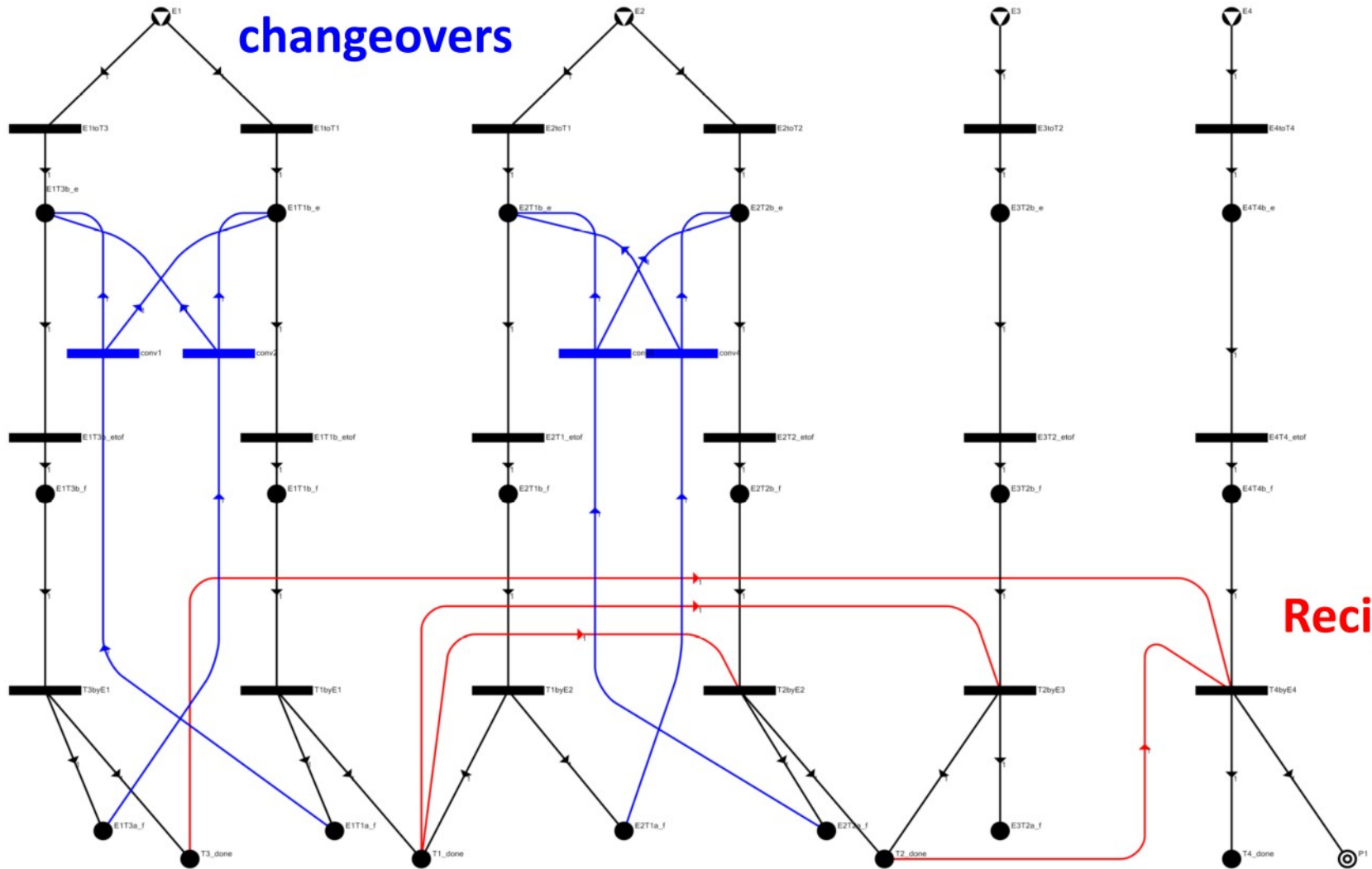


Formulating UIS Scheduling Problem

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Potential changeovers



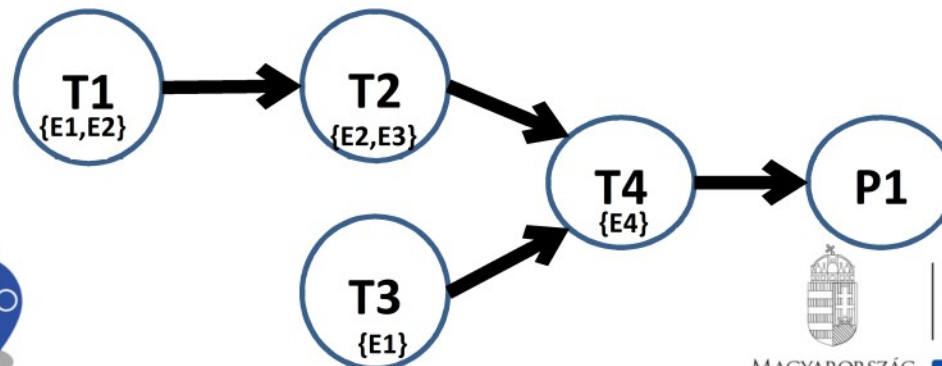
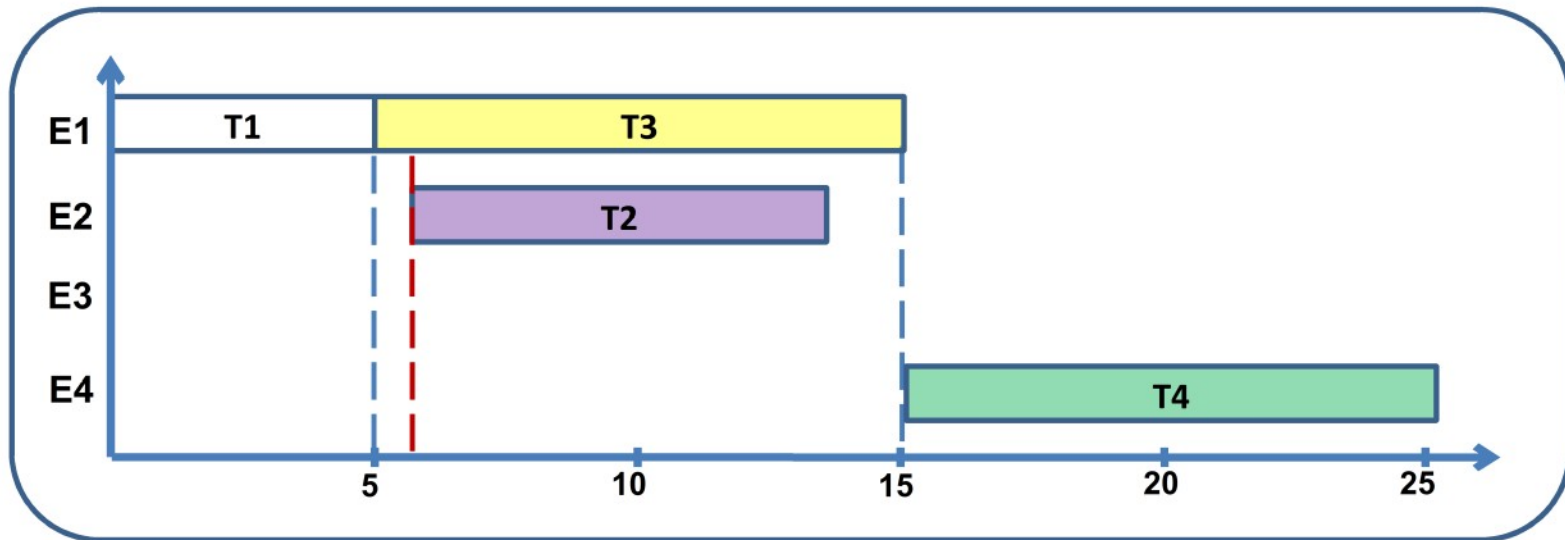
Recipe

Solution of UIS Scheduling Problem

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- UIS case: **25 h**



Comparison of Scheduling Methods

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

	Slot MILP model	Precedence based MILP model	S-graph	TCPNS
Automatic model generation	✓		✓	✓
MILP model	✓			✓
Graph representation	✓	✓		✓
Combinatorial Acceleration			✓	✓
Distributed loading			✓	✓
Mixed storage policy		✓		✓
Avoid cross-transfer	✓	✓		✓
	ε	ε	✓	✓



Publications on Scheduling by P-graphs

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és
hozzáférhetőségének együttes javítása
a Pannon Egyetemen

- Bertok, B., K. Kalauz, Z. Süle, L. T. Fan, and F. Friedler, Algorithmic Synthesis of Process Networks with Time Constraints by the P-graph Framework, presented at the VOCAL 2010, Veszprém, Hungary, December 13-15, 2010.
- Kalauz, K., Z. Süle Z., B. Bertok, F. Friedler, and L. T. Fan, Extending process-network synthesis algorithms with time bounds for supply network design, Chemical Engineering Transactions, 29, 259-264 (2012).
- Frits, M., B. Bertok, Process scheduling by synthesizing time constrained process-networks, Computer Aided Chemical Engineering. 33, p. 1345-1350, 2014.

Thanks you for your attention!

Additional information and free software is available at
p-graph.org



Home

About P-Graph

News

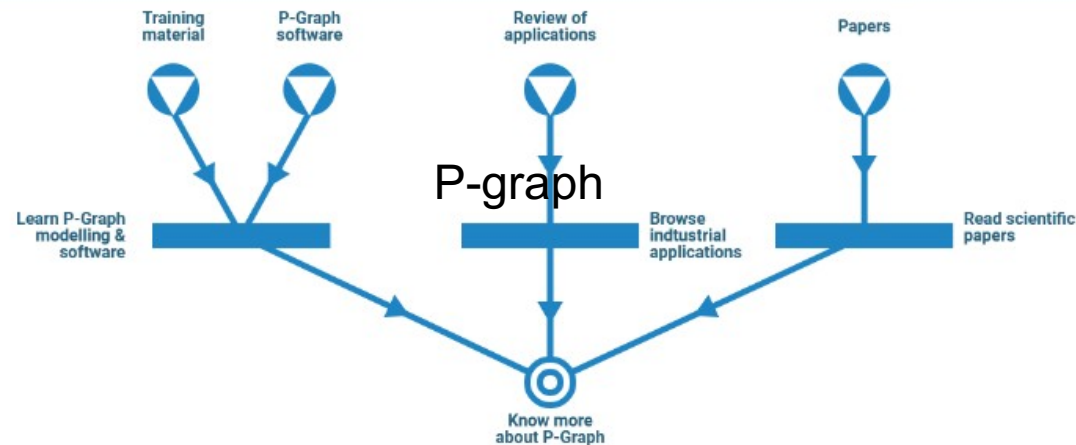
Education

Research

Business

Downloads

Contacts



Resource



Activity



Target

Education

P-Graph is a bipartite graph. One set of nodes (horizontal bars) represents the operating units and the other (solid circles) the material streams.

Research

Referred Journal and Book Articles of the Centre for Advanced Process Optimization.

Business

P-Graph can be used on different industrial and economical areas.

II. P-graph in the Optimization of Industrial Processes

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Outline

Smart City

- St. Margareten – Energy supply planning
- Graz - RegiOpt Energy Management
- Freistadt – Brewery
- Margaret bridge – Resource Allocation
- Barion – Micro payment
- Békéscsaba - EMAX tailored tourist program planner
- Veszprém - ORENBI Electronic workflow management
- IBM - MMM Mobile workforce management



Intelligent Logistic Systems

- PLT – Route Planning
- M4 – Underground scheduling
- Bakonyi Erőmű – Fuel supply scheduling
- 5 Stras – Vehicle scheduling
- MOL – ProdSim
- 5 stars – Vehicle Assignment
- BKV – Bus maintenance scheduling
- Flextronics – Production Scheduling
- Foxconn – Production line balancing
- Sagemcom – Energy Distribution Planning and Control



II.1 Smart City Projects

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

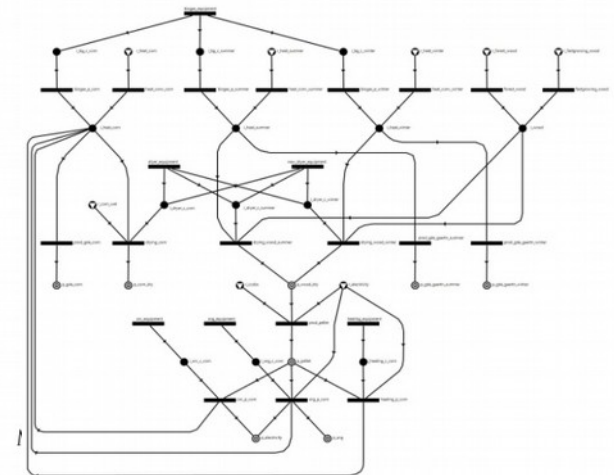
PE-TU Graz: St. Margarethen: Design of regional energy supply system 2005

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

St. Margarethen, Burgenland, Austria

- Raw materials: wet corn, corn cobs, electricity, fast grown wood, forest wood, heat
- Demands: electricity, heating
- Operating units: biogas site, existing and new dryer for wood and corn, pelletizer, heater, organic Rankine cycle plant, synthetic natural gas production, burner
- Demand:
 - 7.2 TJ/year of electricity and
 - 18 TJ/year of heat



PE-TU Graz: Web application for regional energy supply system design

2005

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Basic Economic Data

Default values are based on the Austrian situation ("reference year 2011"). You may change all values according to the situation in your region. Payback period is generally set to 10 years, except for Photovoltaics and Solar thermal where it is set to 25 years. Operating cost for technologies is calculated according to the Austrian situation. Please refer all mass related values to dry matter.

Mater	
Forest	
Materials	Material costs
Wood	85 €/t
Agricult	
Materials	Material costs
Corn Silage	271.23 €/t
Barley	343 €/t
Wheat	335 €/t
Rapeseed	1520 €/t
Sunflower	396.47 €/t
Corn grains	173.1 €/t
Miscanthus	32.8 €/t
Shortrotation	22.98 €/t
Sugar Beet	105.16 €/t
Manure from livestock	7.53 €/m ³
Other oil seeds	0 €/t
Other biomass for burning	0 €/t
Other biomass for biogas	0 €/t
Other cereals	0 €/t
Grassla	
Materials	Material costs
Grass silage	83.29 €/t
Foss	
Materials	Material costs
Natural Gas	1 €/m ³
Diesel	1826 €/t
Othe	
Materials	Material costs
CaCO ₂	30 €/t
Electricity	110 €/MWh
Methanol	230 €/t
...	0 €/t

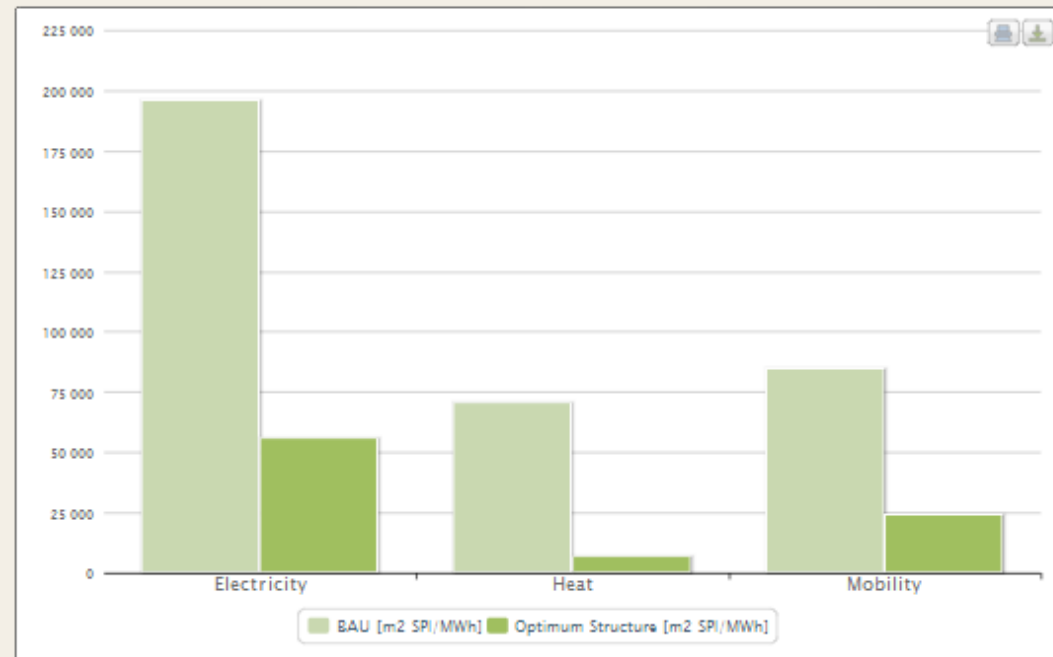
Results

Please note that this is an approximative calculation - based on intrinsic assumptions and your data. For further information or a detailed calculation for your region please contact us.

Tables Technology Network Global-Local Region Comparison **Energy Comparison**

Ecological Footprint comparison

This diagram compares the specific Ecological Footprint for business as usual and the technology system provided by RegiOpt, differentiated between electricity, heat and mobility. All values refer to the provision of one MWh of a given energy service. The smaller the value, the better for the environment.



PE- TU Graz: Freistadt brewery providing heat (as well) 2010

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Historic
city center
13,800 MWh/yr

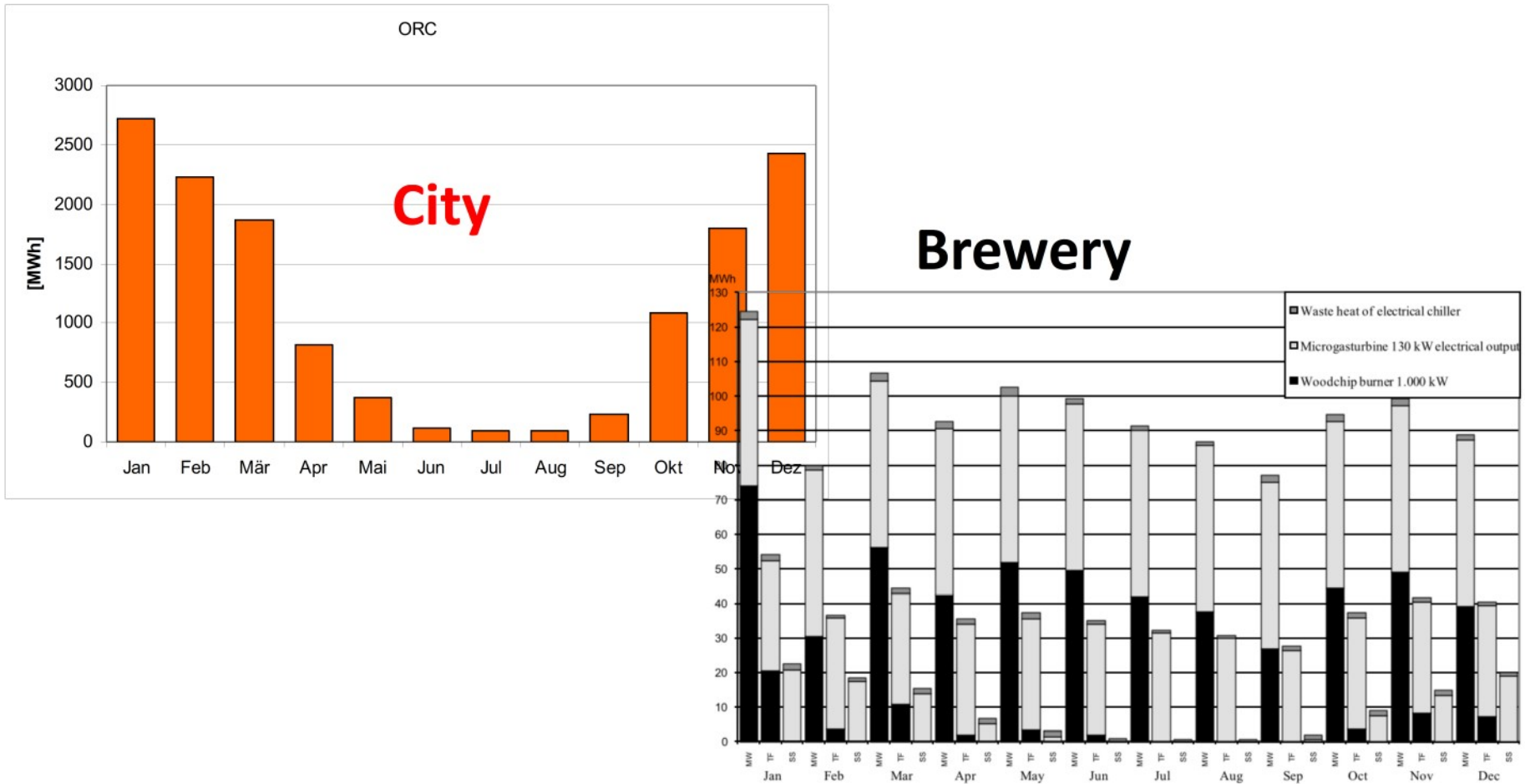
Brewery
3,300 MWh/yr



BE

Challenge: Load balancing

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Resource-task assignment

2010

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- Given
 - Scheduling and resource needs of tasks
 - Availability of resources
- Result
 - Optimal resource scheduling
- Application
 - Construction subcontractor scheduling (Reconstruction of Margaret bridge)

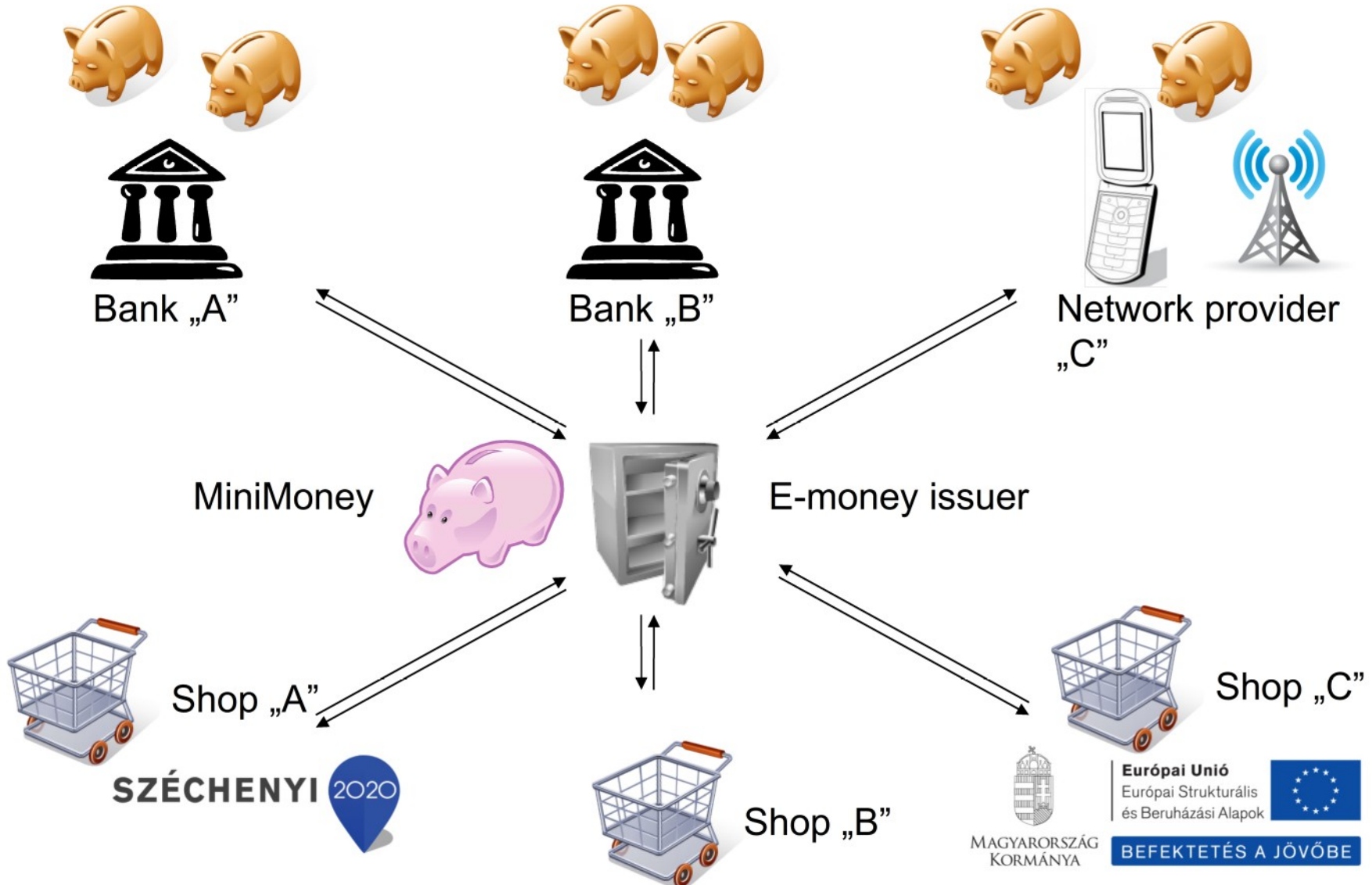


MiniMoney

Server based (online) e-money system

- Simple
- 0.5% transaction fee or less
- Multiple platforms (card, internet, mobile)
- Anonim

Minimoney: Transaction model



EMAX: Tailored tourist program planner 2012

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Események

	Balatoni Hal és Termelői Piac Ingyenes Felhasználható kedvezmény: nincs	1
	Bivalyrezervátum 650 Ft Felhasználható kedvezmény: nincs	2
	Sümegei vár 1 500 Ft Felhasználható kedvezmény: nincs	3
	Apátság 800 Ft Felhasználható kedvezmény: nincs	4

Összesített élmény index: **1.135482**

Csomagra szánt költség: **10000 Ft**
Eseményekre szánt idő: **10 óra**
Meglátogatni kívánt események száma: **4**

2014. Július 10.








Hónap Hét Nap

Élménycsomag szerkeztése

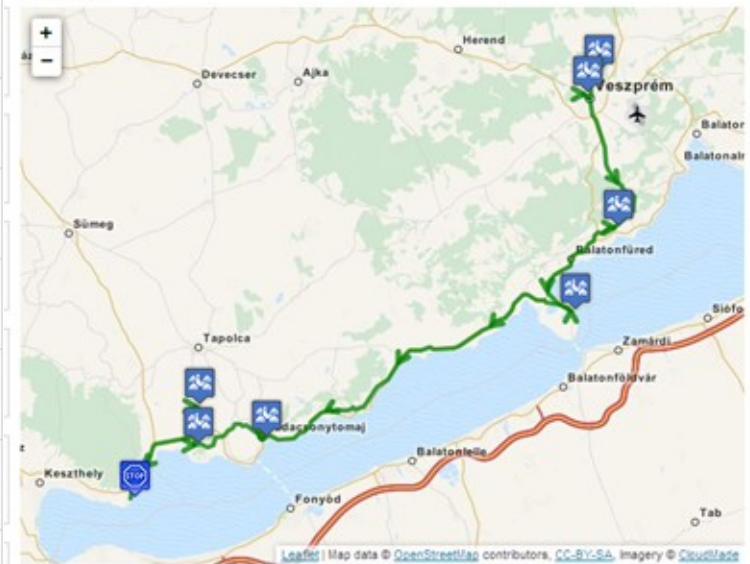
Események 6 Hotellek 10 Éttermek 152

Csomag bővítés

Hotellek

-  Betekints Wellness és Konferen...
8200 Veszprém Veszprémvölgyi utca 4
-  Hotel Jade
null Veszprém Korona köz 3
-  Oliva Hotel és Étterem
null Veszprém Buhim u. undefined
-  Árpád Panzió
8200 Veszprém Külső-Kádártai út 4
-  Tapó Királyi Fogadó és Étterem
8200 Veszprém Pajta u 6
-  Hotel Magister
8200 Veszprém József Attila u. undefined
-  Flamingó Wellness és Konferen...
8230 Balatonfüred Széchenyi u. 16

Térkép



Reference application: Békéscsaba

2014

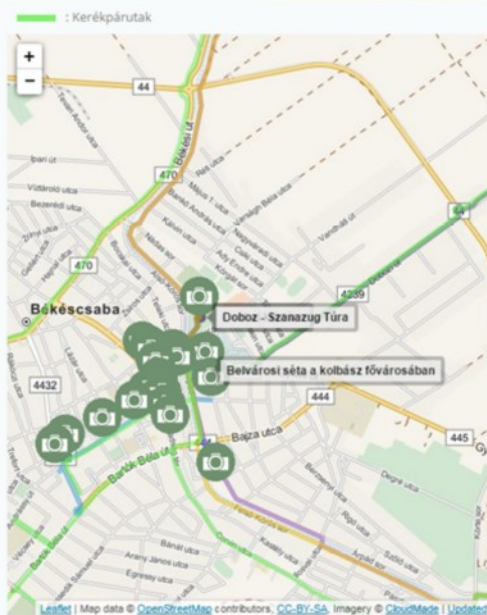
EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Élménycsomagok listázása Látóvalók Szállások Túraútvonalak Élménycsomag összeállítás



ÉLMÉNYCSOMAGOK LISTÁZÁSA



Csbai Körtúra

E számtalan élményt és látóvalót kínáló, információs pontokat és pihenőhelyeket érintő tanósvény jelentőségű körtúra, Békéscsabát és szűkebb külterületi környezetét igyekszik megismertetni az aktív túraélmény jegyében. Az útvonal szinte teljes egészében a városon áthaladó Elővíz-csatornát és a Gerlai-holtágat kíséri. E zöld folyosó önmagában is a település és határos területeinek egyik legjelentősebb természeti eleme, de közelében számos kulturális vagy egyéb környezeti érték is felfedezhető. Kerékpárral és gyalog egyaránt teljesíthető, választástól és egyéni ritmustól függően olyan félnapos, egynapos kikapcsolódást ígér, melyet időbeosztásunk szerint tölthetünk meg változatos túraélményekkel.

- Békéscsaba belvárosa, jelentős átalakulása miatt a jövőben nem csupán, mint kulturális centrum kínál gazdag programlehetőségeket, hanem európai színvonalú rendezvény és közösségi terekkel, multifunkcionális központtal teszi a megyeszékhelyt kiemelt idegenforgalmi területté.

- A Csbai Körtúra, a Pósteleki erdőben a piros sáv túrajelzést követi, mely a kastély egykori építetőjének, gróf Széchenyi Antalnak, dombra emelt síremlékét érinti a kastélytól egy kilométerre, a Nyilas erdőrészen. A körtúra útvonala számos szakaszon bővelkedik vadon termő gyümölcsökben és gyógynövényekben, melyeket „vegízkóstolóni”, vagy gyűjteni különleges élmény. Az epérfák termése, a dió, a bodza, a csipkebogyó, a kőkény, a szeder a legtöbb túrázó számára jól ismert csemegék, a haladó ismeretekkel rendelkezők pedig a csalántól az útifűekig számos egyéb gyógyhatású növényfajra bukkanhatnak.



ORENBI: Process and document template based workflow and resource distribution optimization 2015-

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

The image displays two overlapping software windows. The top window is the 'demo process 4 - BPMN 2.0 Editor', showing a BPMN diagram with a start event, a gateway, and a pool. The bottom window is the 'Teszt dokumentum - Document Editor', showing a document template with a 'Label' section containing placeholder text and a 'Computed' section with a circular reference error: '2015/03/16 Circular references at field(s): Computed1'. The error message is highlighted in red. The document editor also shows a 'Properties' panel for the 'Computed' field, with fields for Name, Value, Operand, Item, Valid, Comput Type, and Position.



ORENBI application: Veszprém compliant management system v2

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

WebSphere Portal **Panaszkezelő központ** Home Levelezés Chat Help Log Out

Üdvözöljük Bodor Betti !

Panaszkezelő központ > Dokumentum azonosító: DOMV-8RBCSA

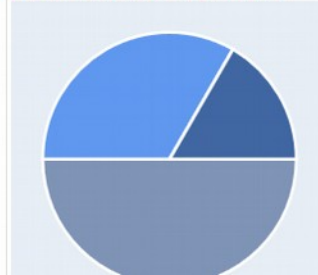
Panasz bezárás

Bejelentő adatai Panasz részletei **A panasz életútja**

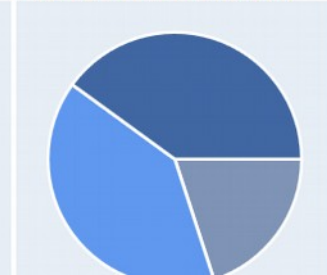
Panasz állapota	Beérkezés ideje	Aktuális csoport	Aktuális ügyintéző	Módosítás típus
Felvett	2012.02.09. 10:11	-	Állampolgár	Állampolgári panasz felvétel
Átírányított	-	-	Rendszer	Átírányítás
Beérkezett	2012.02.09. 10:11	csőtörés	-	-
Megnyitott	-	csőtörés	Bodor Betti	Megnyitás
Megnyitott	-	csőtörés	Bodor Betti	Megnyitás
Megnyitott	-	csőtörés	Bodor Betti	Elnapolás
Megnyitott	-	csőtörés	Bodor Betti	Megnyitás
Megoldott	-	csőtörés	Bodor Betti	Megoldás

- Elnapolt panaszok (5)
- Átszignált panaszok (5)
- Új panaszok (6)
- Bodor Betti (2)

Megoldott panaszok a csoporton belül



Átszignált panaszok a csoporton belül





VESZPRÉM
a királynék városa



A gyors panaszkezelés megkönnyítése érdekében, kérjük minden mezőt töltsön ki!

Személyes adatok kitöltése Panasz részletezése **Panasz beküldése**

Személyes adatok
 Titulus:
 Vezetéknév: Vezetéknév
 Keresztnév: Keresztnév

Lakcím adatok
 Irányítószám: 8200
 Város: Veszprém
 Utca és házszám: Kossuth u. 100.

Kapcsolattartási adatok
 Telefonszám: (60) 789-0136
 E-mail cím: allampolgar@veszprem.hu

Panasz típusa:
 csőtörés

Panasz részletei:
 A Kossuth utcán csőtörés van!



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

PE – IBM: Mobil workforce management 2016

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Smart city operation pilot application

Munkaküldő • Szinkronizáció • Törzsek • Munkafajta • Munkafeladatok • Optimalizálás • Munkarányítás • Mobil munkalap • Jogosultságok • Karbantartás • Munkarányító váltás

Munkafeladatok Művelet Művelet TS státusz: WM státusz: Térkép/Útvonalak Mind

Info	TS státusz	WM státusz	Feladat típus	TS kezdhet ekkor	TS kezdhet eddig	TS végez	OPT kezdés	OPT végez	Fixált	WM kezdés	WM végez	Prioritás
<input type="checkbox"/>	(2) Szerkesztés	(7) Feladat várakozik, ...	elektromos mérő csere	2014.10.26 04:07:43		2015.01.13 14:07:43	2014.10.26 09:52:48	2015.01.13 22:22:48	igen	2014.11.21 13:59:41	2014.12.27 15:32:10	3
<input type="checkbox"/>	(1) Új feladat	(7) Feladat várakozik, ...	elektromos mérő csere	2014.10.26 07:41:46		2015.01.26 16:11:46	2014.10.26 11:20:38	2015.01.26 23:50:38	nem	2014.10.26 11:20:38	2015.01.26 23:50:38	4
<input type="checkbox"/>	(1) Új feladat	(7) Feladat várakozik, ...	elektromos mérő csere	2014.10.27 08:20:14		2015.01.27 18:50:14	2014.10.27 11:51:30	2015.01.28 00:21:30	igen	2014.10.27 10:19:19	2015.01.27 22:49:19	4
<input type="checkbox"/>	(2) Szerkesztés	(7) Feladat várakozik, ...	elektromos mérő csere	2014.10.26 07:11:15		2015.01.26 15:41:15	2014.10.26 12:42:12	2015.01.27 01:12:12	igen	2014.12.21 12:24:54	2014.12.24 08:16:45	3
<input type="checkbox"/>	(2) Szerkesztés	(7) Feladat várakozik, ...	elektromos mérő csere	2014.10.27 07:55:14	14.11.28 16:16:20	2014.12.28 18:20:14	2014.10.27 13:16:37	2014.12.29 01:46:37	igen			3
<input type="checkbox"/>	(1) Új feladat	(7) Feladat várakozik, ...	elektromos mérő felsze...	2014.10.27 07:06:14	14.11.28 16:16:20	2014.12.27 17:30:14	2014.10.27 13:48:59	2014.12.28 02:13:59	nem	2014.10.27 13:48:59	2014.12.28 02:13:59	1
<input type="checkbox"/>	(2) Szerkesztés	(7) Feladat várakozik, ...	elektromos mérő felsze...	2014.10.27 07:30:14	14.11.28 16:16:20	2014.12.28 17:55:14	2014.10.27 14:41:26	2014.12.29 03:06:26	nem	2014.10.27 14:41:26	2014.12.29 03:06:26	3

1. Szeged (Hungary)Napos u. 12
2. Csongrád (HUN)Fő u. 4
3. Mindszent (HUN)Szabadság utca 40
4. Hódmezővásárhely (HUN)Botond u. 12
5. Hódmezővásárhely (HUN)Teleki u. 4
6. Szeged (HUN)Tölgyfa u. 84
7. Szeged (HUN)Csaba utca 26
8. Szeged (HUN)Bai fasor 4
9. Szeged (HUN)Óroszlán utca 4
10. Szeged (HUN)Oskola utca 4
11. Szeged (Hungary)Napos u. 12



II.2 Development of Intelligent Logistic Systems

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok

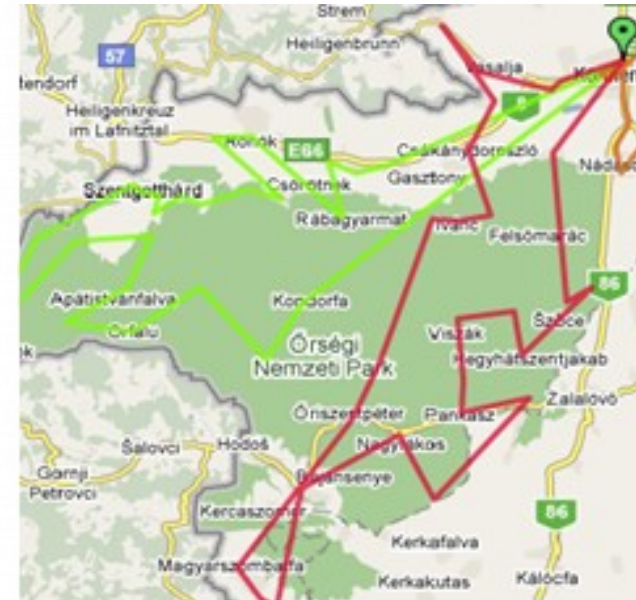
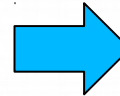


BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

PLT Group: Route planning 2007

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Part of original route Part of optimized route

- **7.7%** reduction in the total **cost**
- **6.7%** reduction in the **CO₂** emission

SZÉCHENYI 2020



M4: Metro construction 2008

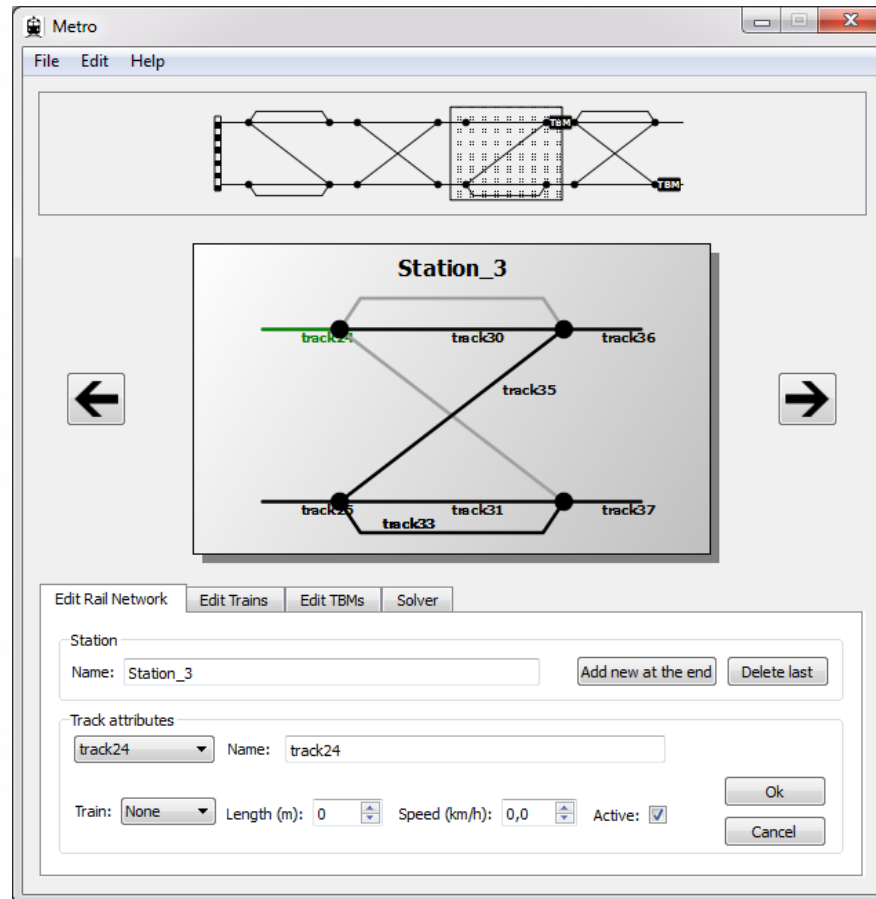
EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



PE – M4: Train scheduling software

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Fuel supply scheduling: Bakonyi Power Plant 2008

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



2009. szeptember 4, péntek - Névjegy

- Főoldal
- Bemutató
- Bakonyi Erőmű Zrt. tevékenysége
- Távhőtermelés
- Villamos energiatermelés
- Távhőszolgáltatás
- Hivatalos dokumentumok
- Tanúsítványok, engedélyek
- Beszámolók
- Hírek, közlemények
- Hírek
- Közlemények
- Környezetvédelem, klímavédelem
- Fotógalleria
- Erőmű
- Események
- Videók, animációk
- Elérhetőség
- Vendégkönyv

Környezet

A Részvényársaság technika, technológiai fejlesztésekhez szükséges alapot. A beruházás megvalósított, ill.

- Elektrofűtés
- Hibrid-fűtés
- A légszűrő
- Megújuló létesítés
- Korszerű
- Folyamat
- Zárt vízi
- Recirkuláció
- Víz- és tá
- Zagytéri
- Korszerű
- Az üzemi
- Ártalmatlan

A Társaságnál a hatósági előírások

A levegőtisztaság bioenergia használatának január 1-től biztosított a környezetvédelmi megközelítés.

A következő évek legfontosabb feladata lesz az egyes telephelyek energetikai hasznosításának előkészítése és a rekultivációs feladatok végrehajtása.

Csoportok

Navigáció: vissza a listához

Név: HM Verga

Megjegyzés:

Szerződött szállítási mennyiségek:

2009			2010		
	garantált + opció	többlet felajánlás		garantált + opció	többlet
január	4000 t	0 t	január	0 t	0 t
február	2900 t	1000 t	február	0 t	0 t
március	2800 t	1000 t	március	0 t	0 t
április	3000 t	1100 t	április	0 t	0 t
május	3500 t	1000 t	május	0 t	0 t
június	3300 t	1700 t	június	0 t	0 t
július	3100 t	1800 t	július	0 t	0 t
augusztus	2800 t	1900 t	augusztus	0 t	0 t
szeptember	2700 t	1000 t	szeptember	0 t	0 t
október	3000 t	1800 t	október	0 t	0 t
november	2900 t	900 t	november	0 t	0 t
december	2000 t	900 t	december	0 t	0 t

Havi túrés (garantált + opció mennyiség):
10 %
+/- 10% esetén azt kell írni: 10

Havi túrés (többlet felajánlás):
20 %
+/- 15% esetén azt kell írni: 15

Csoportok

Navigáció: vissza a listához

Sikeres módosítás!

Csoport neve: HM Verga

Jelenlegi hét: 2009. 21. hét

Korábbi hetek:

Dátum	Hegedezett mennyiség	Lefoglalt mennyiség
2009. 16. hét 04. 13. - 04. 19.	1025 t	900 t (-125 t)
2009. 17. hét 04. 20. - 04. 26.	1025 t	1555 t (+530 t)
2009. 18. hét 04. 27. - 05. 03.	1125 t	1150 t (+25 t)
2009. 19. hét 05. 04. - 05. 10.	1125 t	1730 t (+605 t)
2009. 20. hét 05. 11. - 05. 17.	1125 t	2445 t (+1320 t)

Korlátok megadása:

Dátum	Hegedezett mennyiség	Lefoglalt mennyiség	Módosítás	Info
2009. 21. hét 05. 18. - 05. 24.	1000 t	2406 t (+1406 t)	<input type="radio"/> szerződés (1125 t) <input checked="" type="radio"/> egyedi: 1000 t	Normál: 1125 t Minimum: 987 t Maximum: 1262 t
2009. 22. hét 05. 25. - 05. 31.	2000 t	2185 t (+185 t)	<input type="radio"/> szerződés (1125 t) <input checked="" type="radio"/> egyedi: 2000 t	Normál: 1125 t Minimum: 987 t Maximum: 1262 t
2009. 23. hét 06. 01. - 06. 07.	1250 t	825 t (-425 t)	<input type="radio"/> szerződés (1250 t) <input type="radio"/> egyedi: t	Normál: 1250 t Minimum: 1082 t Maximum: 1417 t
2009. 24. hét 06. 08. - 06. 14.	1250 t	970 t (-280 t)	<input checked="" type="radio"/> szerződés (1250 t) <input type="radio"/> egyedi: t	Normál: 1250 t Minimum: 1082 t Maximum: 1417 t
2009. 25. hét 06. 15. - 06. 21.	1250 t	1170 t (-80 t)	<input checked="" type="radio"/> szerződés (1250 t) <input type="radio"/> egyedi: t	Normál: 1250 t Minimum: 1082 t Maximum: 1417 t
2009. 26. hét 06. 22. - 06. 28.	1250 t	1175 t (-75 t)	<input checked="" type="radio"/> szerződés (1250 t) <input type="radio"/> egyedi: t	Normál: 1250 t Minimum: 1082 t Maximum: 1417 t
2009. 27. hét 06. 29. - 07. 05.	1250 t	460 t (-790 t)	<input checked="" type="radio"/> szerződés (1250 t) <input type="radio"/> egyedi: t	Normál: 1250 t Minimum: 1077 t Maximum: 1422 t
2009. 28. hét 07. 06. - 07. 12.	1250 t	0 t (-1250 t)	<input checked="" type="radio"/> szerződés (1250 t) <input type="radio"/> egyedi: t	Normál: 1250 t Minimum: 1077 t Maximum: 1422 t
2009. 29. hét 07. 13. - 07. 19.	1250 t	0 t (-1250 t)	<input checked="" type="radio"/> szerződés (1250 t) <input type="radio"/> egyedi: t	Normál: 1250 t Minimum: 1077 t

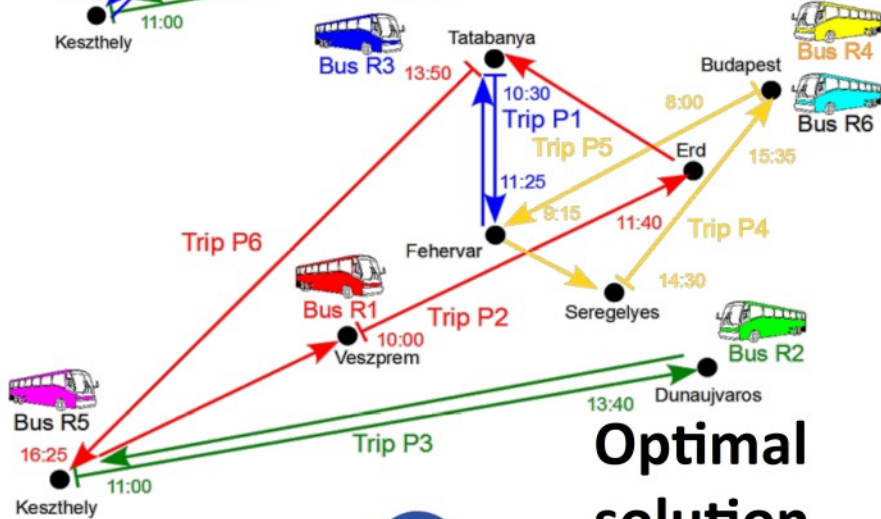
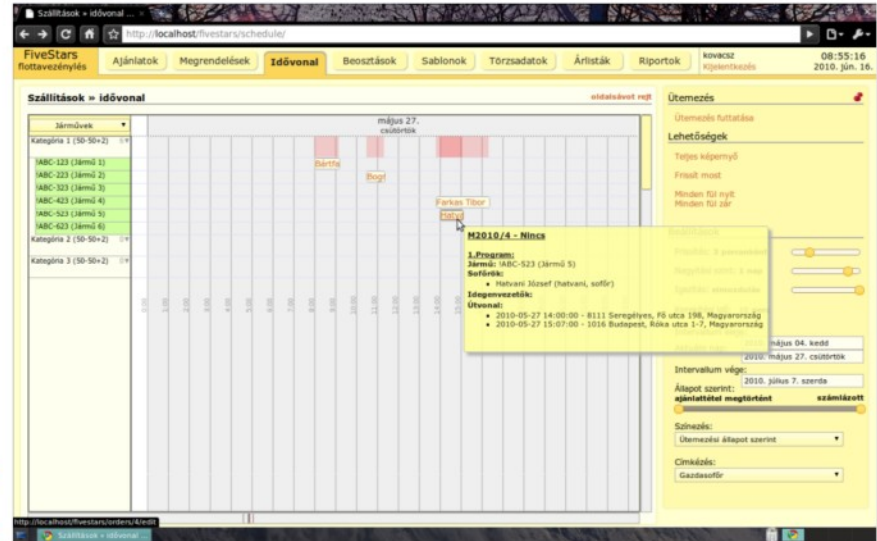
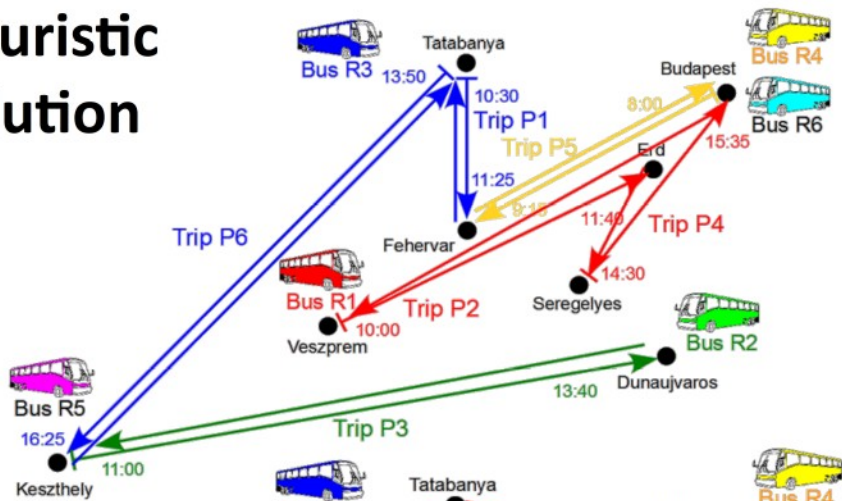
Five Stars: Vehicle scheduling

2009

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Heuristic solution



27% reduction in cost
24% reduction in CO₂ emission

Optimal solution



Európai Unió
 Európai Strukturális
 és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

PE-BKV: Bus maintenance scheduling 2009

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- Defined
 - Time table, state of vehicle and risk of failure
- Result
 - Optimal maintenance scheduling
- Application
 - Scheduling of daytime maintenance of local buses

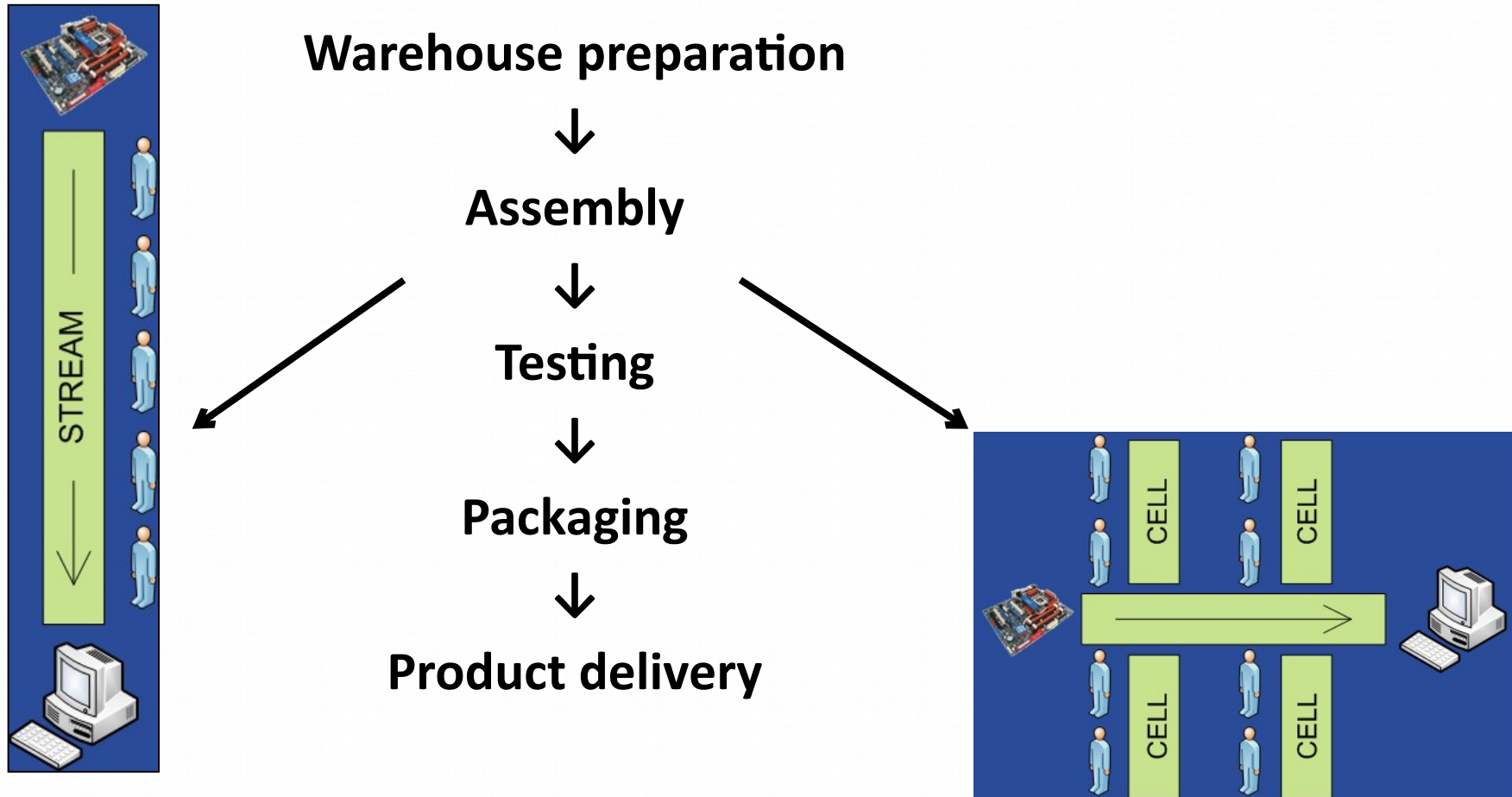


PE – Flexronics: Computer assembly scheduling

2011

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



PE – Flextronics: Production scheduling

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

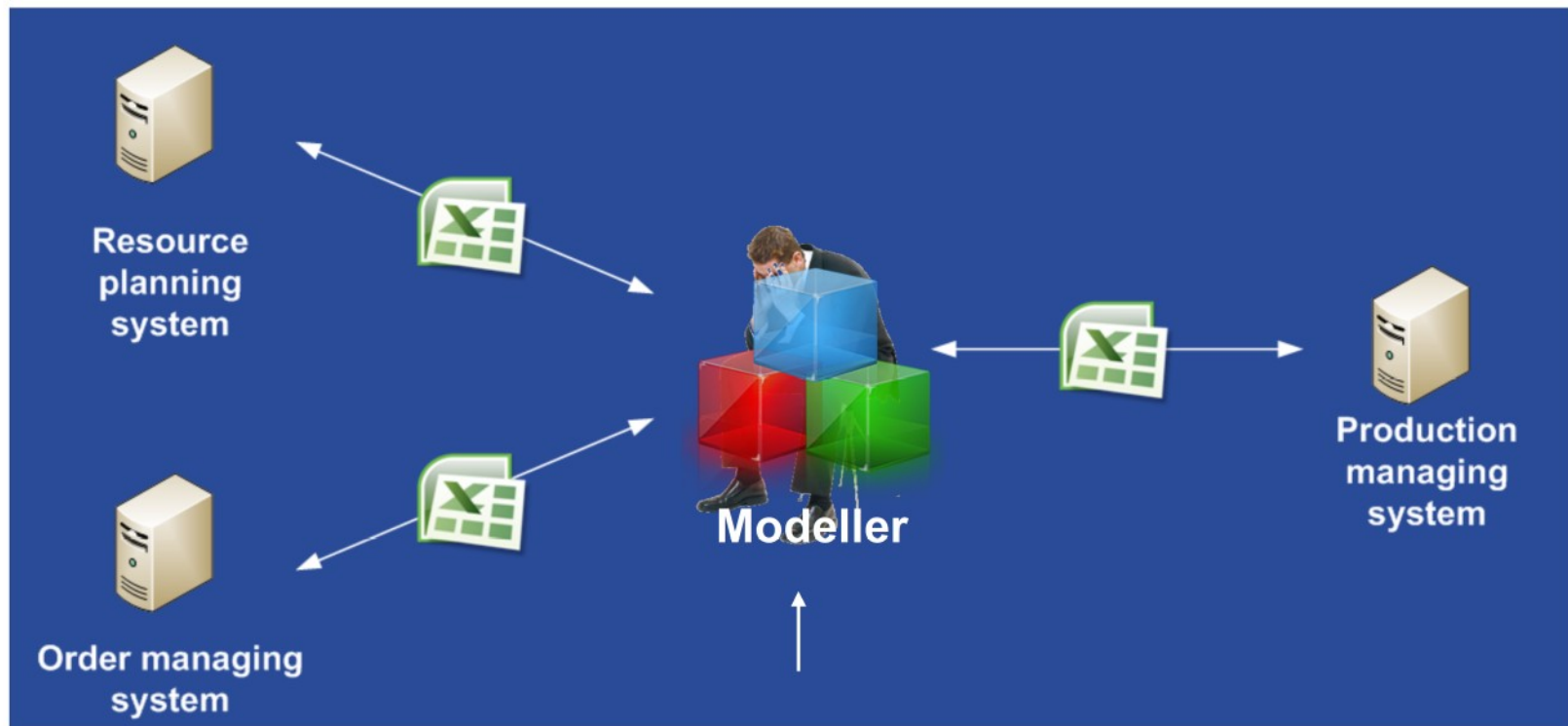
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

The image depicts a man in a light blue shirt and red tie, sitting at a desk with his hands pressed against his face in a gesture of stress or frustration. Behind him is a large, detailed spreadsheet with numerous columns and rows of data, representing a production scheduling problem. A large, stylized question mark is superimposed over the spreadsheet, emphasizing the complexity and uncertainty of the task. The spreadsheet includes various data points, such as dates, quantities, and status indicators, typical of a manufacturing planning system.

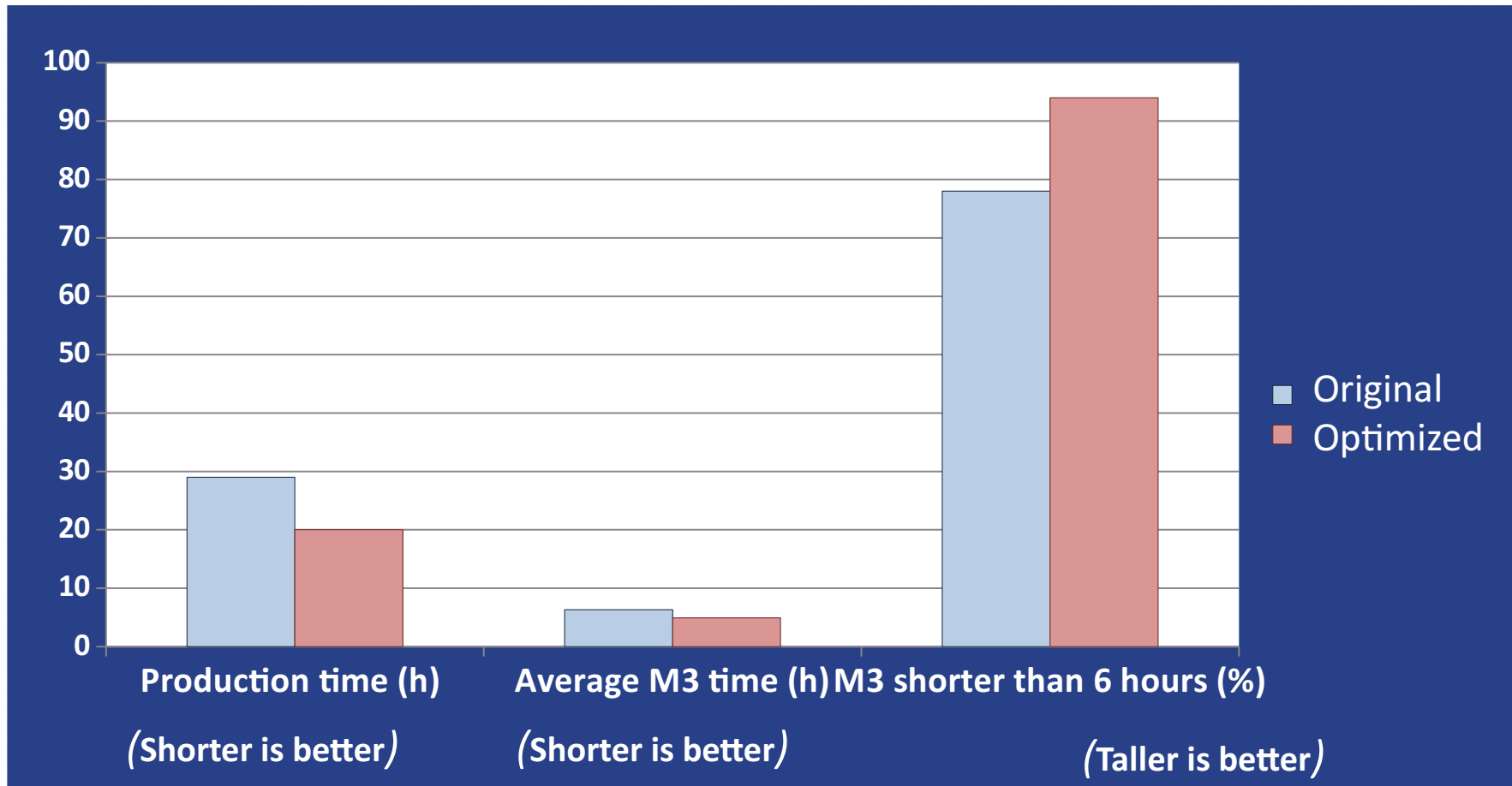
PE – Flextronics: Production scheduling

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



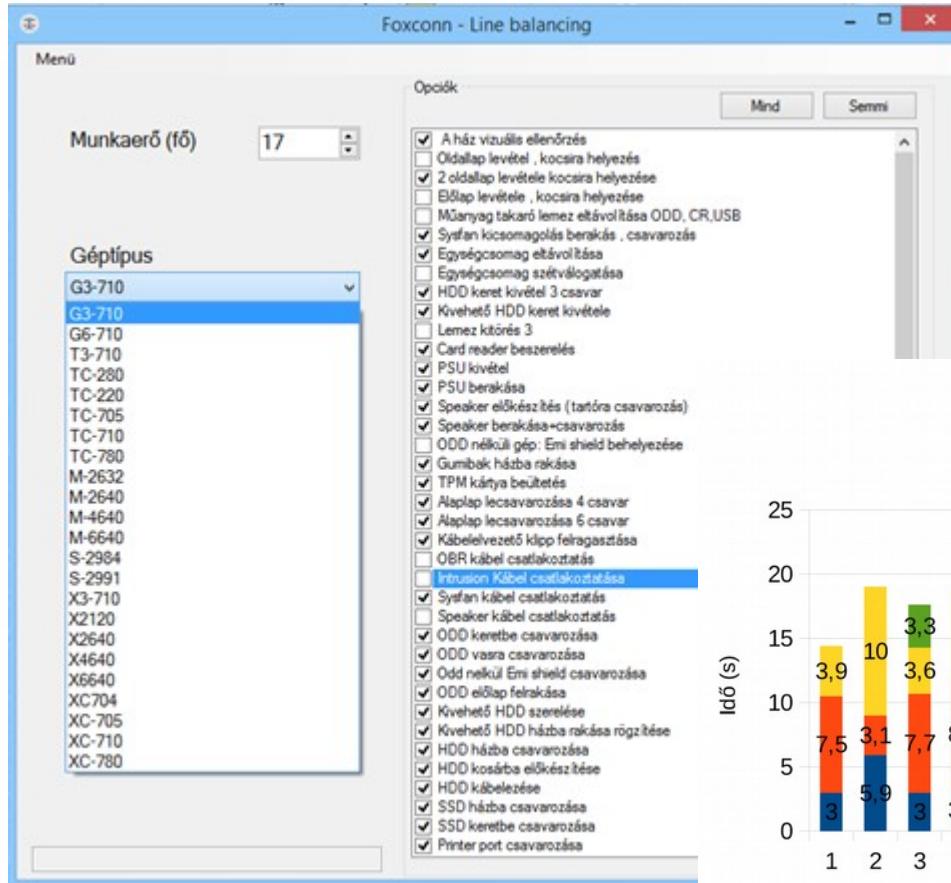
Case study: Each parameter improved



PE – Foxconn: Line balancing 2016

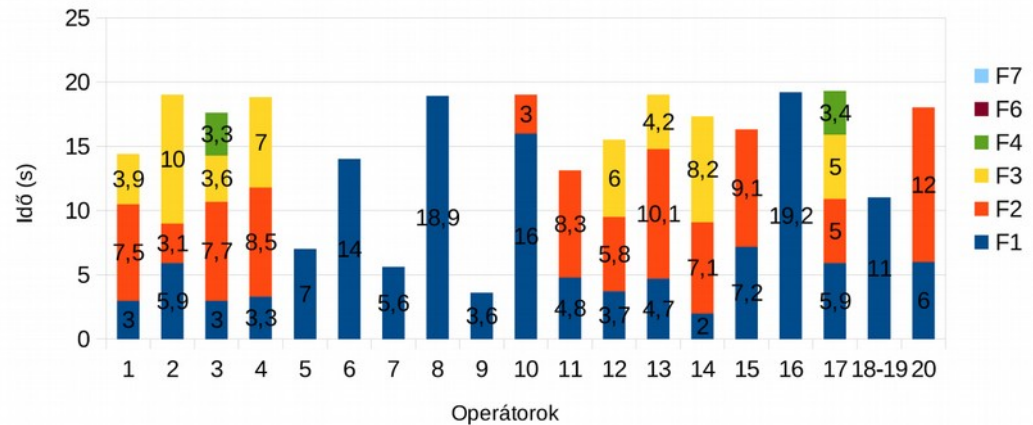
EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



X2640 feladatai

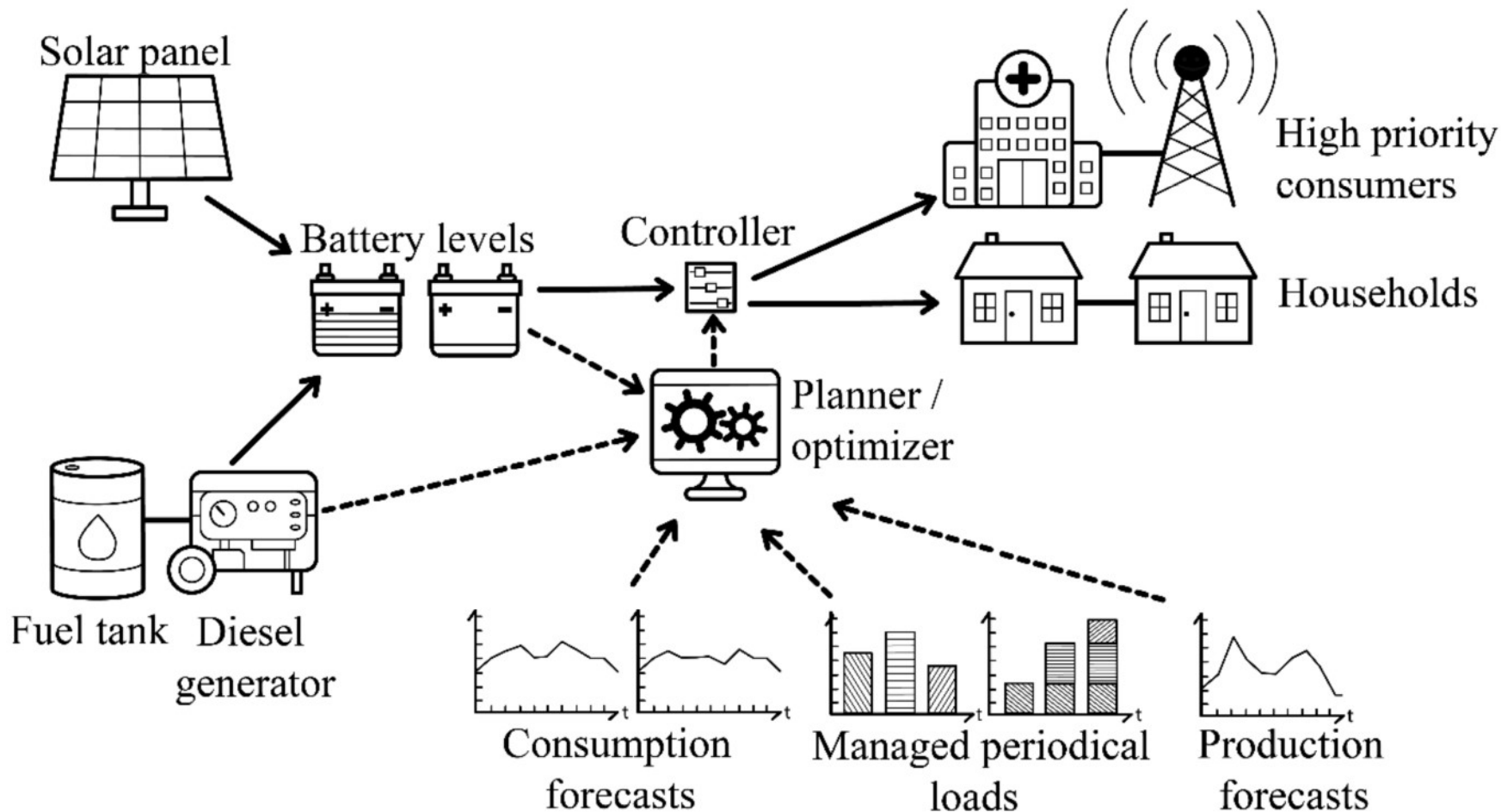
19+1 főre az ütemidő: 19,3 s



Energy Distribution Planning and Control 2019

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Economic Evaluation

- Satisfying all the demands of the secondary consumers: **14% more energy is sold**
- Due to the price for higher service level: the **total income is increased by 14.5%**
- As a result:
The payback period is shortened from 7 to 6 years

Outline

Smart City

- St. Margareten – Energy supply planning
- Graz - RegiOpt Energy Management
- Freistadt – Brewery
- Margaret bridge – Resource Allocation
- Barion – Micro payment
- Békéscsaba - EMAX tailored tourist program planner
- Veszprém - ORENBI Electronic workflow management
- IBM - MMM Mobile workforce management

Intelligent Logistic Systems

- PLT – Route Planning
- M4 – Underground scheduling
- Bakonyi Erőmű – Fuel supply scheduling
- 5 Stras – Vehicle scheduling
- MOL – ProdSim
- 5 stars – Vehicle Assignment
- BKV – Bus maintenance scheduling
- Flextronics – Production Scheduling
- Foxconn – Production line balancing
- Sagemcom – Energy Distribution Planning and Control

III. Combinatorial Techniques in Process Network Synthesis

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Outline

- III.1 Source of complexity:
Combinatorial nature of the problem
- III.2 Combinatorial tools
- III.3 Algorithmic Generation of the Maximal Structure
- III.4 Algorithmic Generation of the Solution Structures
- III.5 Accelerated branch & bound algorithm for solving
PNS problems
- III.6 Process Network Synthesis: Branch & Bound

III.1 Source of complexity: Combinatorial nature of the problem

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Introduction

MINLP

$$\min g(x,y)$$

s.t.

$$f(x, y) \leq 0$$

$$x \in \mathcal{R}^n, y \in \{0, 1\}^m$$

- Most MINLP model can not represent a practical problem.
- Additional information is embedded implicitly in the model of a practical problem.
- Idea: this information can effectively control the procedure.

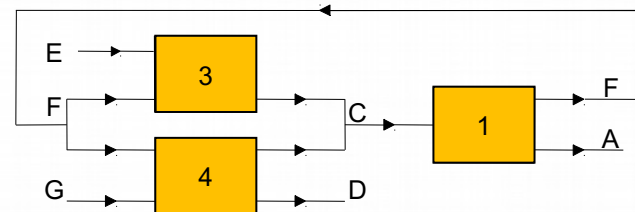
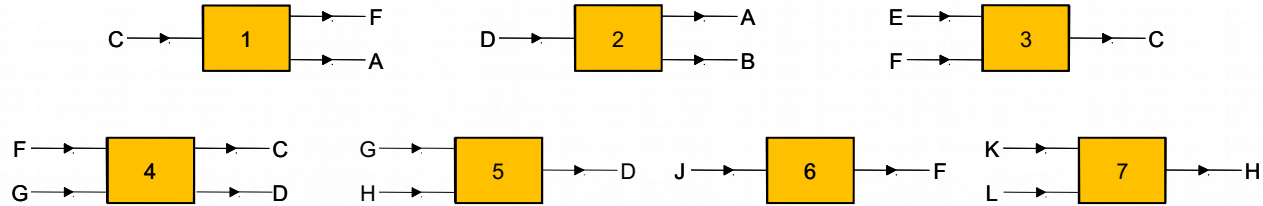
Illustrative example

PNS 1

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Operating units:



Product: A

Raw materials: E, G, J, K, L

Feasible flowsheet

Example PNS 1

- Product: A
- Raw materials: E, G, J, K, L
- Plausible operating units

Type	Inputs	Outputs
1	C	A, F
2	D	A, B
3	E, F	C
4	F, G	C, D
5	G, H	D
6	J	F
7	K, L	H

Example PNS 1

Number of

- operating units: 7
- binary variables: 7
- combinations: 127 ($=2^7-1$)

Synthesis of an Industrial Process (Example PNS 2)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- Product: A61
- Raw materials: A1, A2, A3, A4, A6, A7, A8, A11, A15, A17, A18, A19, A20, A23, A27, A28, A29, A30, A34, A43, A47, A49, A52, A54

Plausible Operating Units

No.	Type	Inputs	Outputs
1	Feeder	A1	A5
2	Reactor	A2, A3, A4	A9
3	Reactor	A3, A4, A6, A11	A10
4	Reactor	A3, A4, A5	A12
5	Reactor	A3, A4, A5	A13
6	Reactor	A7, A8, A14	A16
7	Reactor	A8, A14, A18	A16
8	Separator	A9, A11	A21, A22, A24
9	Separator	A10, A11	A22, A24, A37
10	Separator	A12	A25, A26
11	Separator	A13	A25, A31
12	Dissolver	A15, A16	A32

Plausible Operating Units (Cont'd)

No.	Type	Inputs	Outputs
13	Reactor	A14, A17, A18, A19, A20	A33
14	Reactor	A6, A21	A35
15	Washer	A22, A23	A48
16	Washer	A5, A24	A36
17	Separator	A5, A11, A25	A37, A38, A39
18	Separator	A11, A26	A40, A42
19	Reactor	A14, A27, A28, A29, A30	A41
20	Separator	A11, A31	A40, A42
21	Centrifuge	A32	A44, A45
22	Washer	A33, A34	A46
23	Separator	A36	A14, A48
24	Separator	A38	A14, A48

Plausible Operating Units (Cont'd)

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

No.	Type	Inputs	Outputs
25	Filter	A41	A50, A51
26	Washer	A43, A44	A53
27	Filter	A46	A55, A56
28	Separator	A47, A48	A5, A57
29	Separator	A48, A49	A5, A58
30	Separator	A50	A59, A60
31	Dryer	A51, A54	A61
32	Dryer	A52, A53	A61
33	Dryer	A54, A55	A61
34	Distillation	A59	A62, A63
35	Separator	A60	A64, A65

Example PNS 2

Number of

- operating unit: 35
- binary variables: 35
- combinations: 34 billion
- subproblems at a B&B (worst case): 130 million

III.2 Combinatorial tools

SZÉCHENYI  2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

P-graph framework

Rigorous technique is based on combinatorics, especially on the following items:

- P-graph

New structure representation.

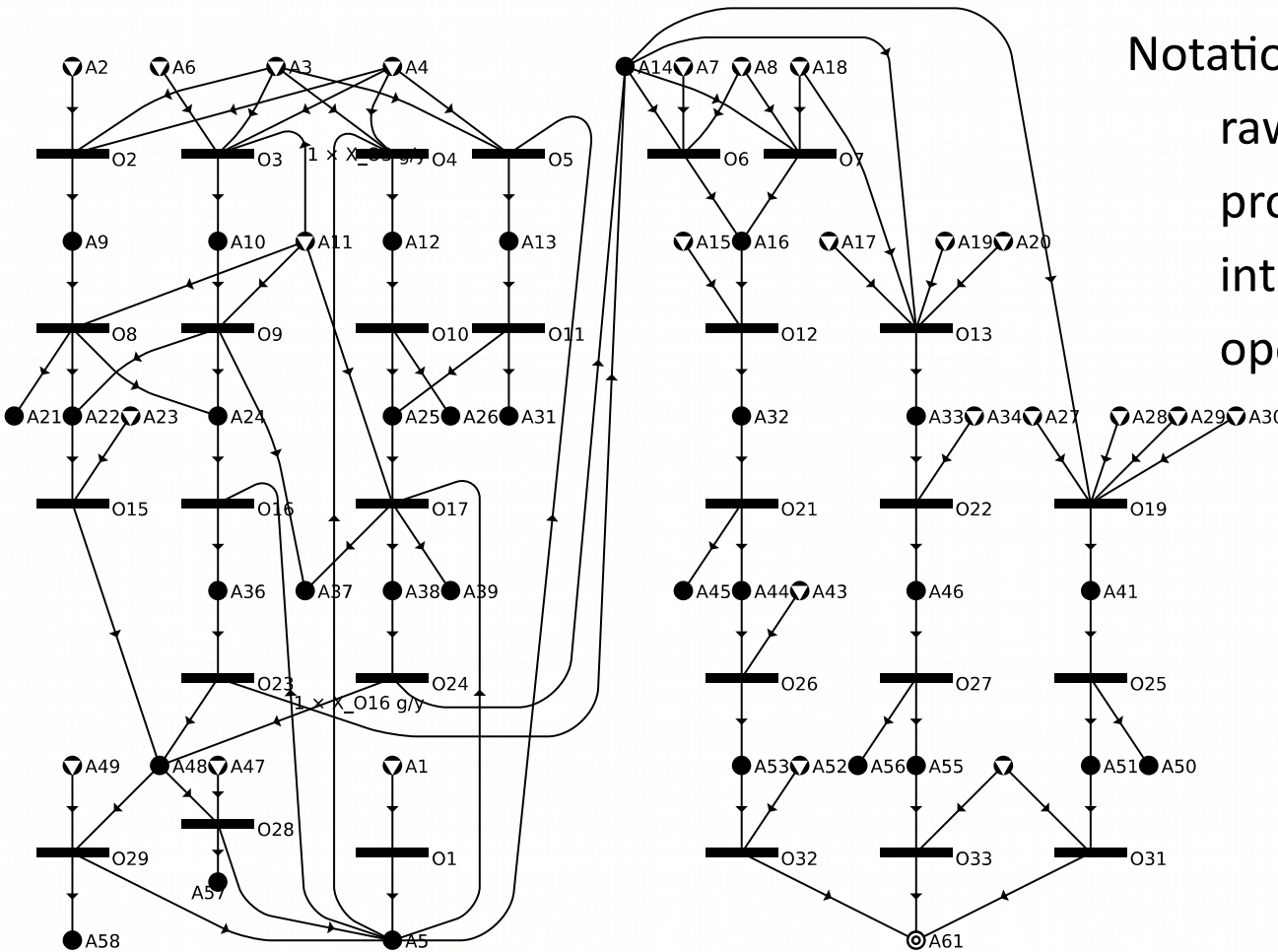
- Axioms

The fundamental properties of combinatorially feasible process structures

- Algorithms

Effective and rigorous combinatorial algorithms for process synthesis

P-Graph Representation of a Synthesis Problem PNS 2



Notations

raw materials:



product:



intermediates:



operating units:



Axioms of Combinatorially Feasible Process Structures

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

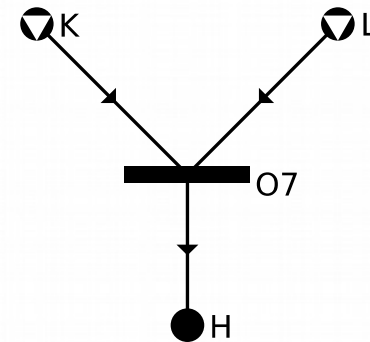
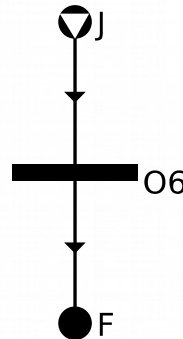
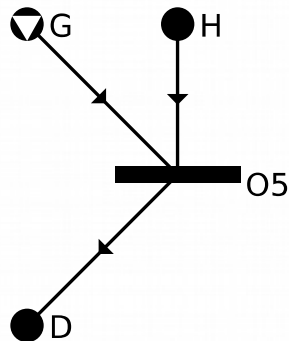
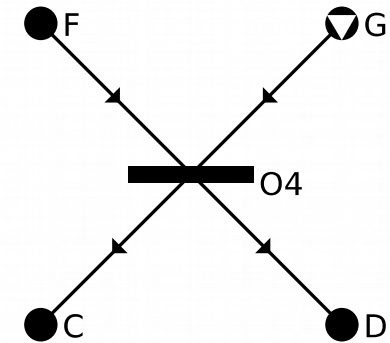
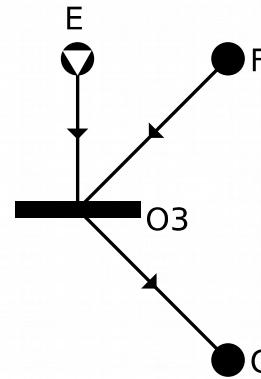
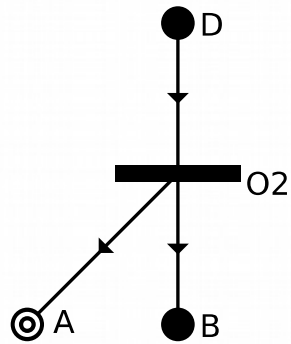
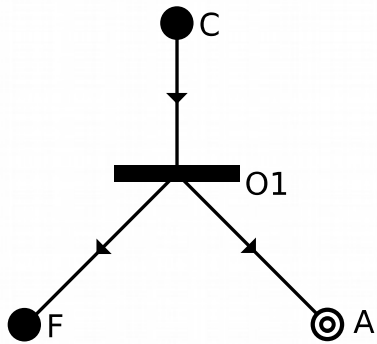
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

For given process synthesis problem, a P-graph satisfying the following five axioms is a combinatorially feasible structure.

- (S1) Every final product is represented in the structure.
- (S2) A material represented in the structure is a raw material if and only if it is not an output of any operating unit represented in the structure.
- (S3) Every operating unit represented in the structure is defined in the synthesis problem.
- (S4) Any operating unit represented in the structure has at least one path leading to a product.
- (S5) If a material belongs to the structure, it must be an input to or output from at least one operating unit represented in the structure.

Combinatorially Feasible Structures: Example PNS 1

Operating units given:

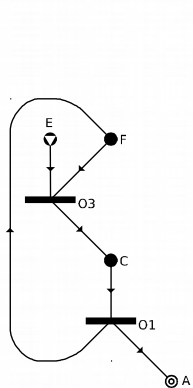


166

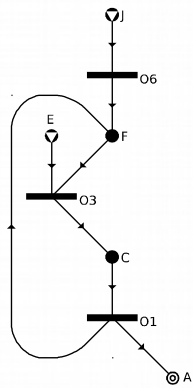
Combinatorially Feasible Structures Of Example PNS 1

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

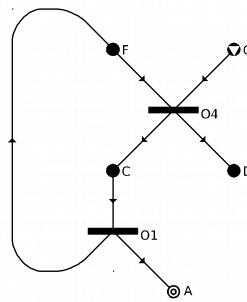
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



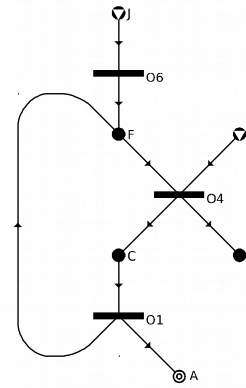
Structure #1



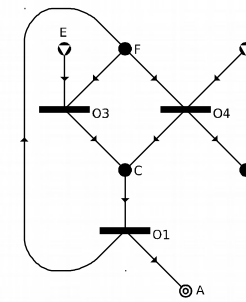
Structure #2



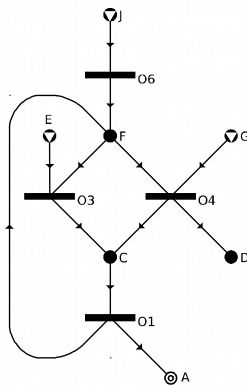
Structure #3



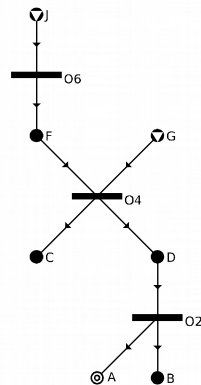
Structure #4



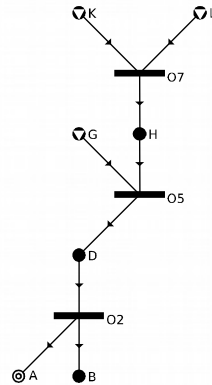
Structure #5



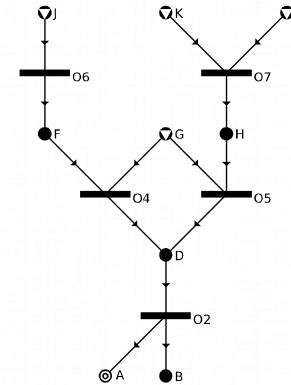
Structure #6



Structure #7



Structure #8

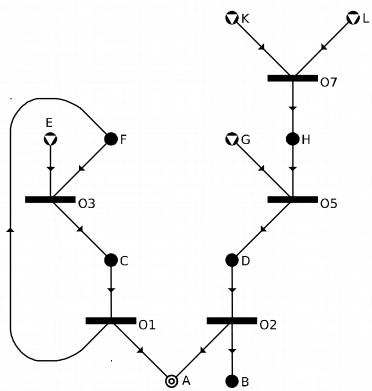


Structure #9

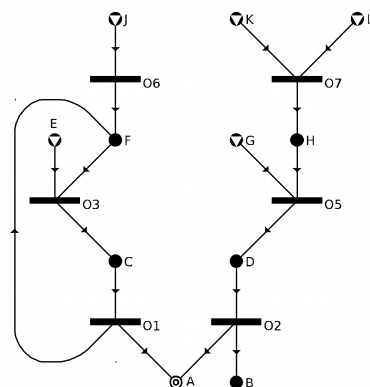
Combinatorially Feasible Structures Of Example PNS 1 (Cont'd)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

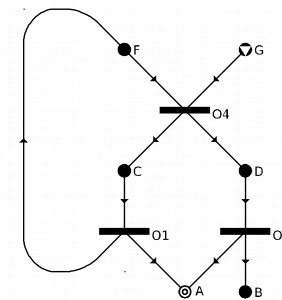
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



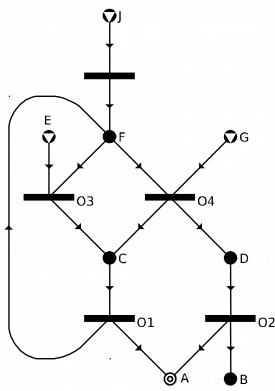
Structure #10



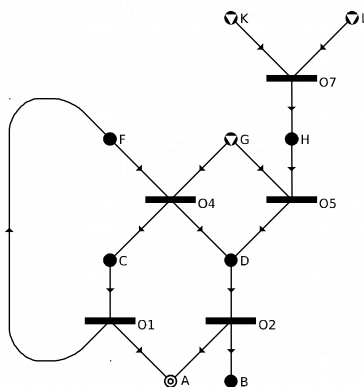
Structure #11



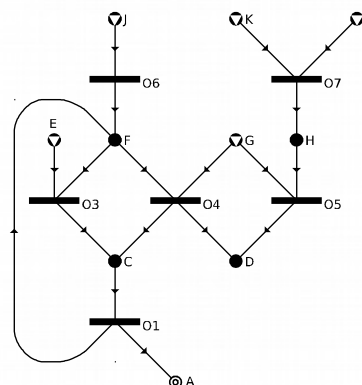
Structure #12



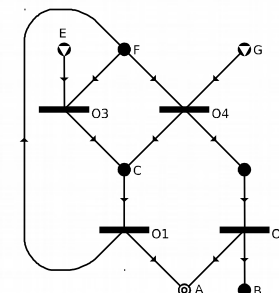
Structure #13



Structure #14



Structure #15

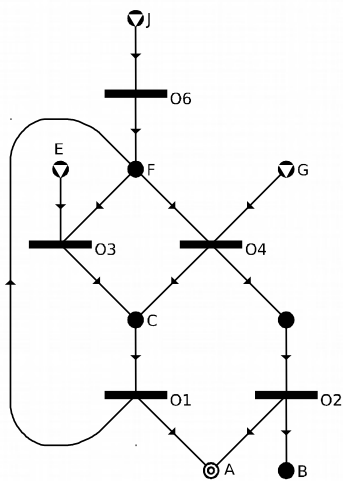


Structure #16

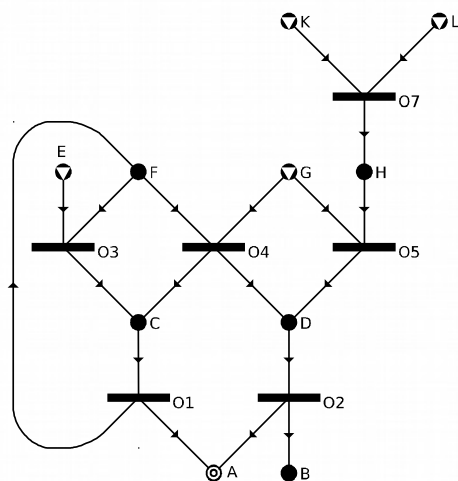
Combinatorially Feasible Structures Of Example PNS 1 (Cont'd)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

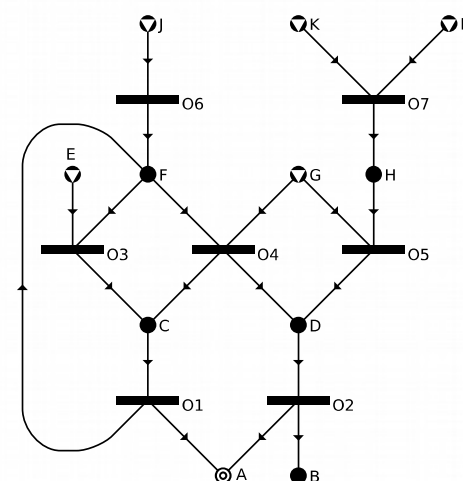
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Structure #17



Structure #18



Structure #19

Industrial Process (Example PNS 2)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és
hozzáférhetőségének együttes javítása
a Pannon Egyetemen

- The five axioms reduce the

34 billion combinations of the operating units to
3,465 combinatorially feasible structures.

The optimal solution is included in the set of 3465
feasible structures.

III.3 Algorithmic Generation of the Maximal Structure

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

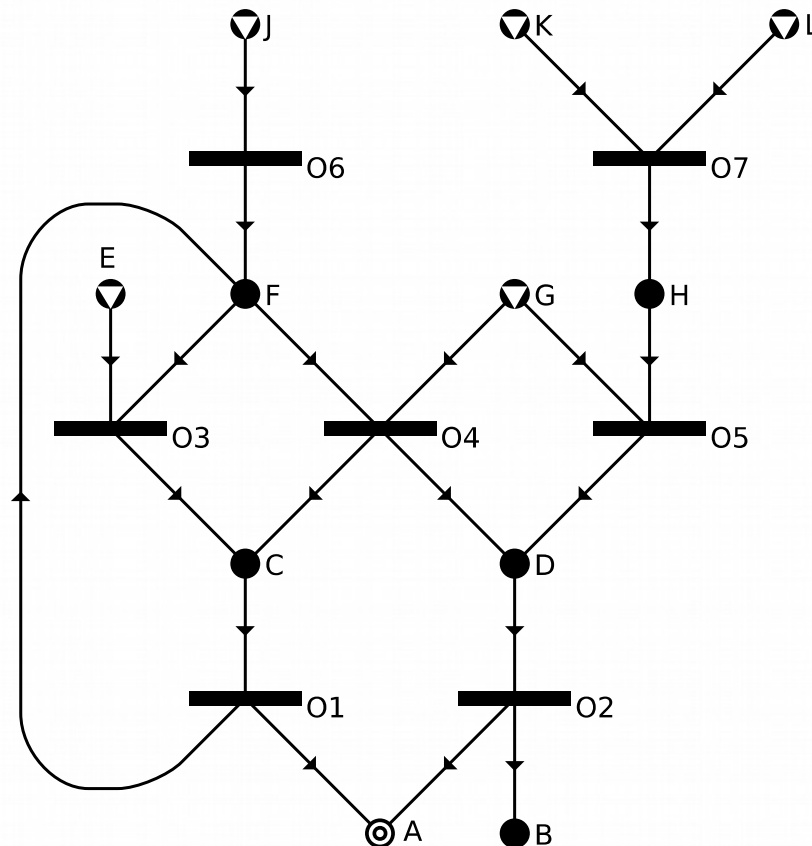
Maximal Structure

- The union of all combinatorially feasible structures is called the maximal structure.
- The maximal structure is a rigorous super-structure.

Maximal Structure Of The Illustrative Example PNS 1

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Algorithm MSG: Generation Of The Maximal Structure

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és
hozzáférhetőségének együttes javítása
a Pannon Egyetemen

- Input:
 - Synthesis problem given by
 - set of raw materials
 - set of products
 - set of candidate operating units
- Output:
 - maximal structure

Formal Description Of The Combinatorial Component Of PNS

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

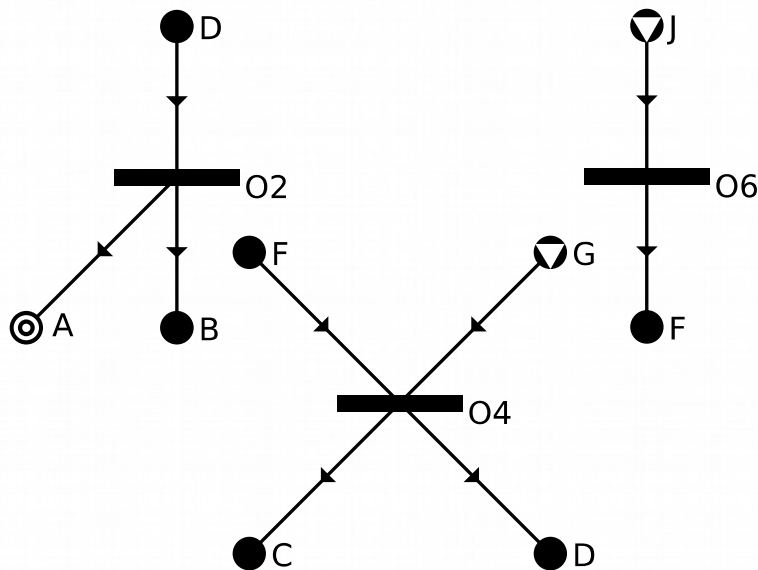
- Let a finite set of materials M be given.
- The combinatorial components of a PNS problem is given by triplet (P,R,O)
where
 - $P \subseteq M$ is the set of products to be produced
 - $R \subseteq M$ is the set of raw materials
 - $O \subseteq \wp(M) \times \wp(M)$ is the set of operating units.
- It is assumed that $P \cap R = \emptyset$.

Formal Definition: P-graph

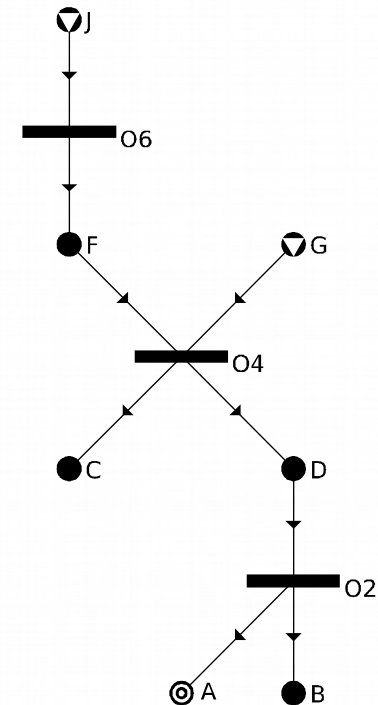
- A P-graph can be considered as a directed bipartite graph.
 M is the set of materials
 O is the set of operating units, where
 $O \subseteq \wp(M) \times \wp(M)$, $O \cap M = \emptyset$
- If $(\alpha, \beta) \in O$, then, α is the input set, and β is the output set of this operating unit.
- Pair (M, O) is defined to be a P-graph with the set of vertices $M \cup O$ and the set of arcs $\{(x, y) : y = (\alpha, \beta) \in O \ \& \ x \in \alpha\} \cup \{(y, x) : y = (\alpha, \beta) \in O \ \& \ x \in \beta\}$.

P-graph: Example

- $m = \{A, B, C, D, F, G, J\}$
- $o = \{O2 = (\{D\}, \{A, B\}), O4 = (\{F, G\}, \{C, D\}), O6 = (\{J\}, \{F\})\}$



- P-graph (m, o)



Structural Mappings

For a P-graph (m, o) let

- $\psi^+(o) = Y\beta : \forall (\alpha, \beta) \in o$ the set of materials, each of which is an output from at least one operating unit in set o
- $\psi(o) = Y(\alpha \cup \beta) : \forall (\alpha, \beta) \in o$ yields the set of materials, each of which is either an input to or an output from at least one operating unit in set o
- $\varphi^+(m) = \{(\alpha, \beta) : \alpha \cap m \neq \emptyset\}$ the set of operating units, each of which consumes at least one material in set m
- $m_1 \Rightarrow_o m_2$ if and only if $m_2 = \psi^+(\varphi^+(m_1) \cap o)$
- \Rightarrow_o^* be the reflexive, transitive closure of \Rightarrow_o

Axioms of Combinatorially Feasible Process Structures

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

P-graph (m, o) is a **combinatorially feasible structure** of PNS problem (P, R, O) if it satisfies axioms given below:

(S1) Every final product is represented in the structure, i.e., $(P \subseteq m)$

(S2) A vertex of the M-type has no input if and only if it represents a raw material, i.e. $(m \setminus \psi^+(o) = m \cap R)$

(S3) Every vertex of the O-type represents an operating unit defined in the synthesis problem, i.e. $(o \subseteq O)$

(S4) Every vertex of the O-type has at least one path leading to a vertex of the M-type representing a final product, i.e. there is such an m' that $m' \cap P \neq \emptyset$ and $\psi^+(\{op\}) \Rightarrow_o^* m'$

(S5) If a vertex of the M-type belongs to the graph, it must be an input to or output from at least one vertex of the O-type in the graph, i.e. $(m \subseteq \psi(o))$

Algorithm MSG: The Maximal Structure Generator

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

inputs: sets M, P, R, O ;

comment: $P \subseteq M, R \subseteq M, O \subseteq p(M) \times p(M), O \cap M = \emptyset, P \cap R = \emptyset$;

output: maximal structure (m, o) of synthesis problem (P, R, O) ;

begin

reduction part of the algorithm;

composition part of the algorithm;

end

- Note: The complexity of algorithm MSG is polynomial.

MSG: Reduction part

```

st1:  $O := O \setminus \varphi^-(R)$ ;
st2:  $M := \Psi(O)$ ;
st3:  $r := \Psi^-(O) \setminus (\Psi^+(O) \cup R)$ ;
lp4: while r is not empty do
    begin
        let x be an element of r;
         $M := M \setminus \{x\}$ ;
         $o := \varphi^+(\{x\})$ ;
         $O := O \setminus o$ ;
         $r := (r \cup (\Psi^+(o) \setminus \Psi^+(O))) \setminus \{x\}$ ;
    end;
co5: if  $P \cap M \neq P$  then stop;
    comment: there is no maximal structure;

```

MSG: Composition part

```

st6: p:=P; m:= ∅; o:= ∅;
lp7: while p is not empty do
    begin
        let x be an element of p;
        m:=m∪{x};
        ox:= φ-({x});
        o:=o∪ ox;
        p:=(p∪ Ψ-(ox))\ (R∪m);
    end;
st8: m:= Ψ(o);

```

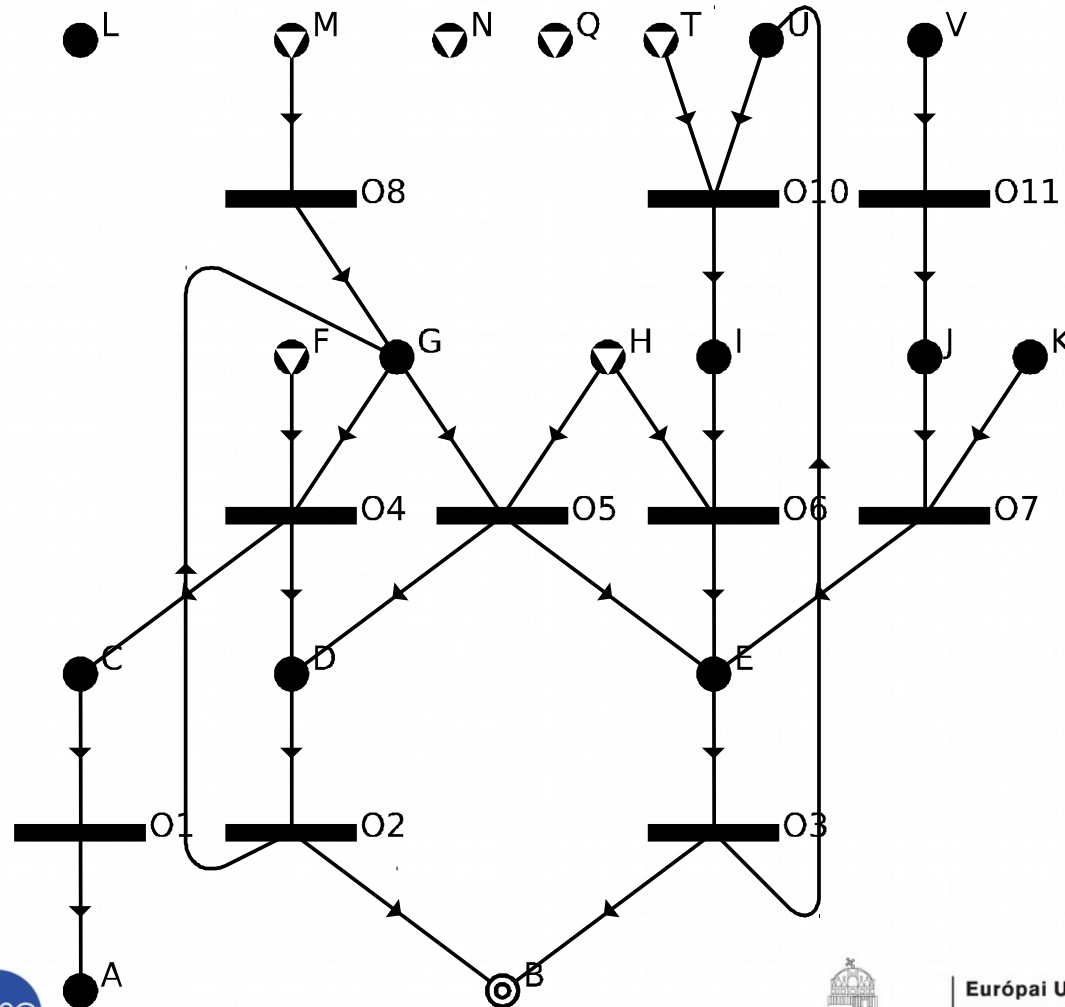
MSG: Example

- Materials: $M = \{A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, Q, T, U, V\}$
- Product: $P = \{B\}$
- Raw materials: $R = \{F, H, M, T\}$
- Operating units: $O = \{O1 = (\{C\}, \{A\}), O2 = (\{D\}, \{B, G\}), O3 = (\{E\}, \{B, U\}), O4 = (\{F, G\}, \{C, D\}), O5 = (\{G, H\}, \{D, E\}), O6 = (\{H, I\}, \{E\}), O7 = (\{J, K\}, \{E\}), O8 = (\{M\}, \{G\}), O9 = (\{N, Q\}, \{H\}), O10 = (\{T, U\}, \{I\}), O11 = (\{V\}, \{J\})\}$.

Structure generated by statements st1 ($\varphi^-(R)=\{O9\}$)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

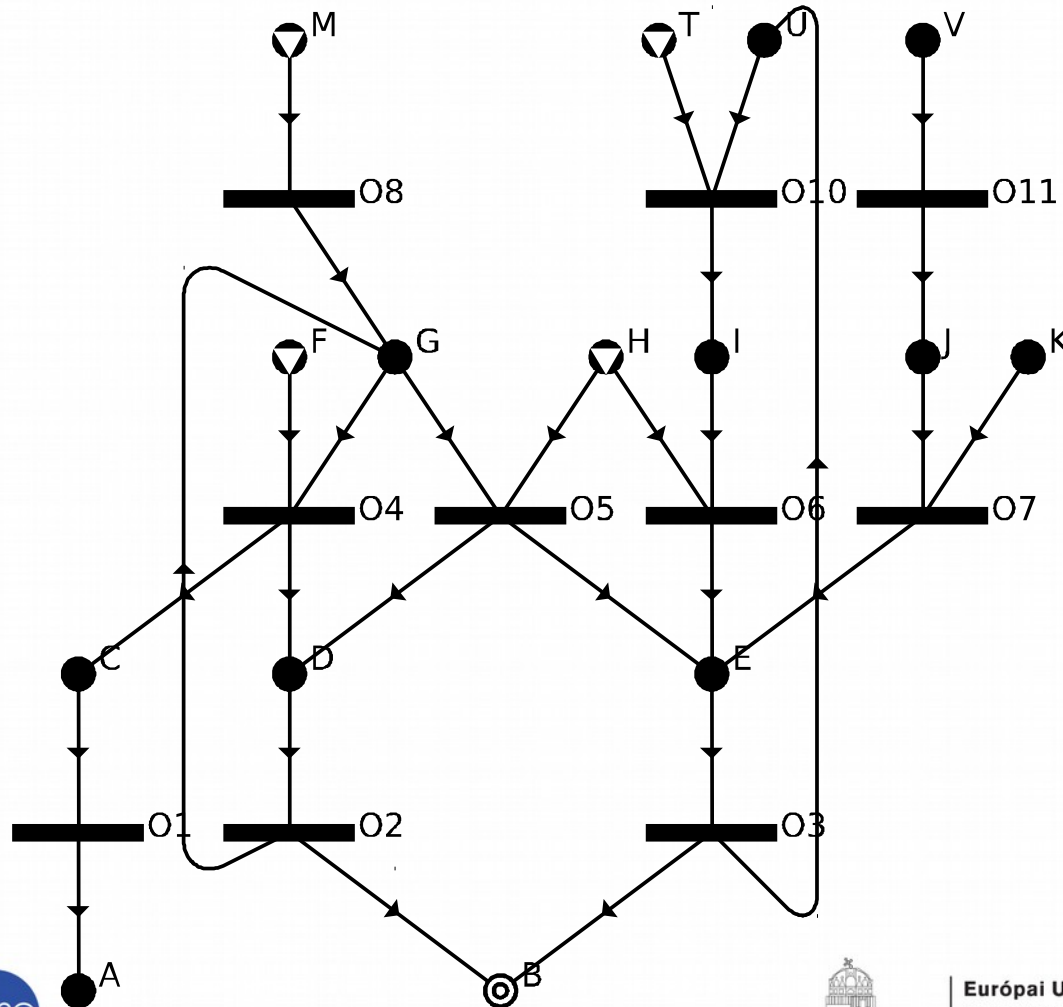
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Structure generated by statements st2

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

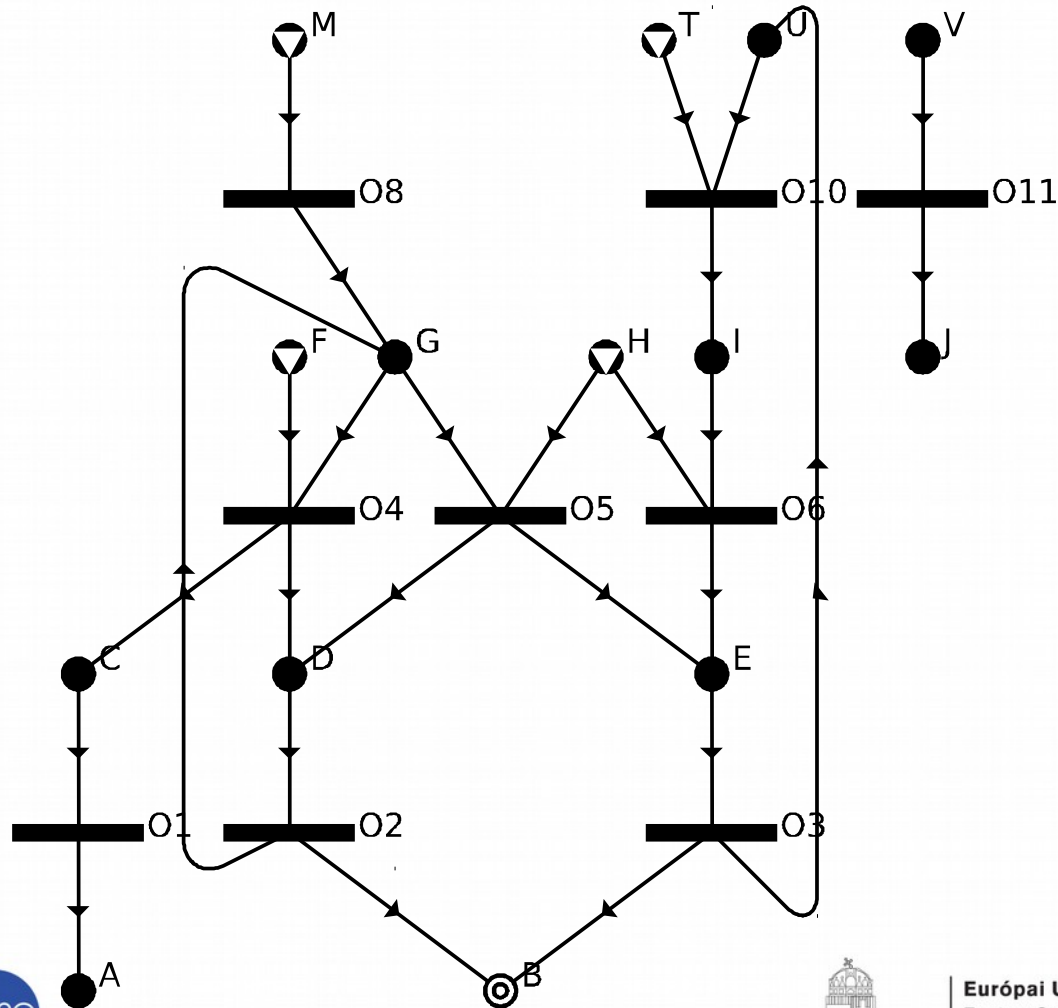
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Structure generated by first iteration of Ip4 (x=K)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

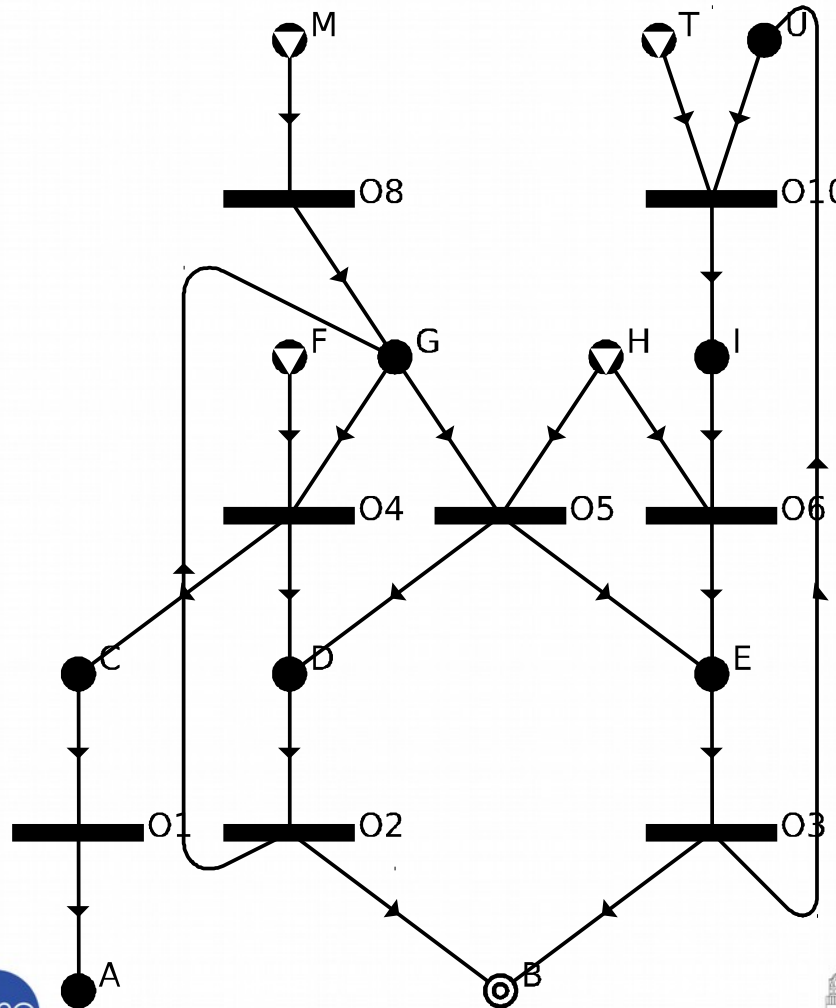
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Structure generated by second iteration of Ip4 ($x=V$)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

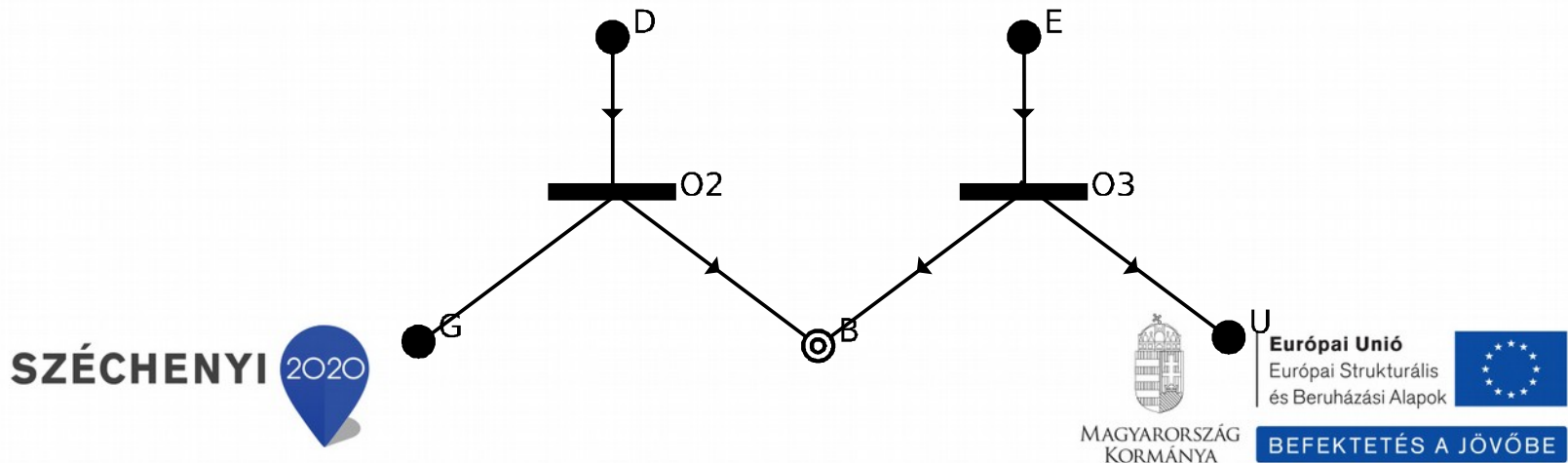
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Structure after the first iteration of loop Ip7 ($x=B$)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

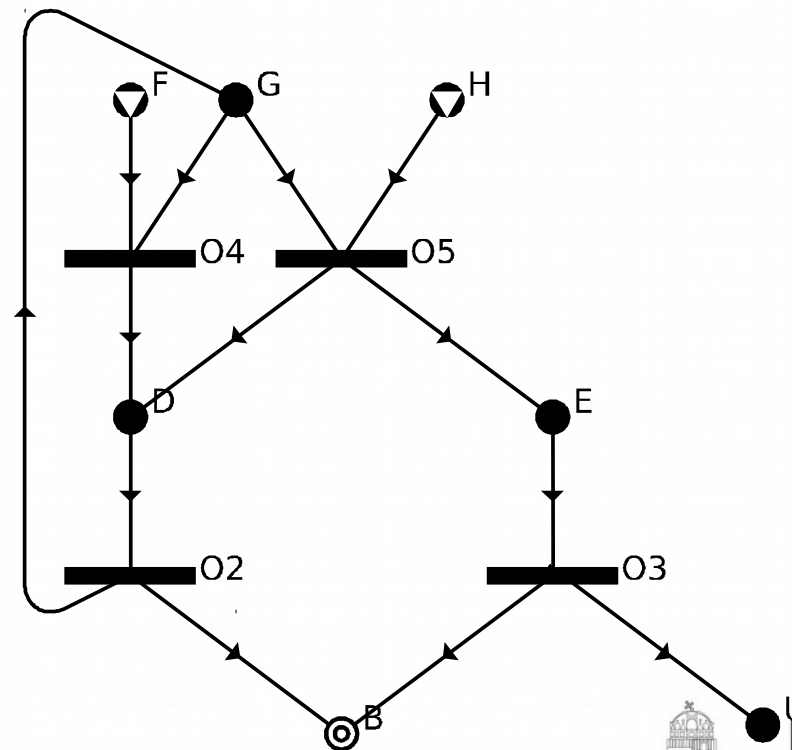
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Structure after the second iteration of loop lp7 (x=D)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

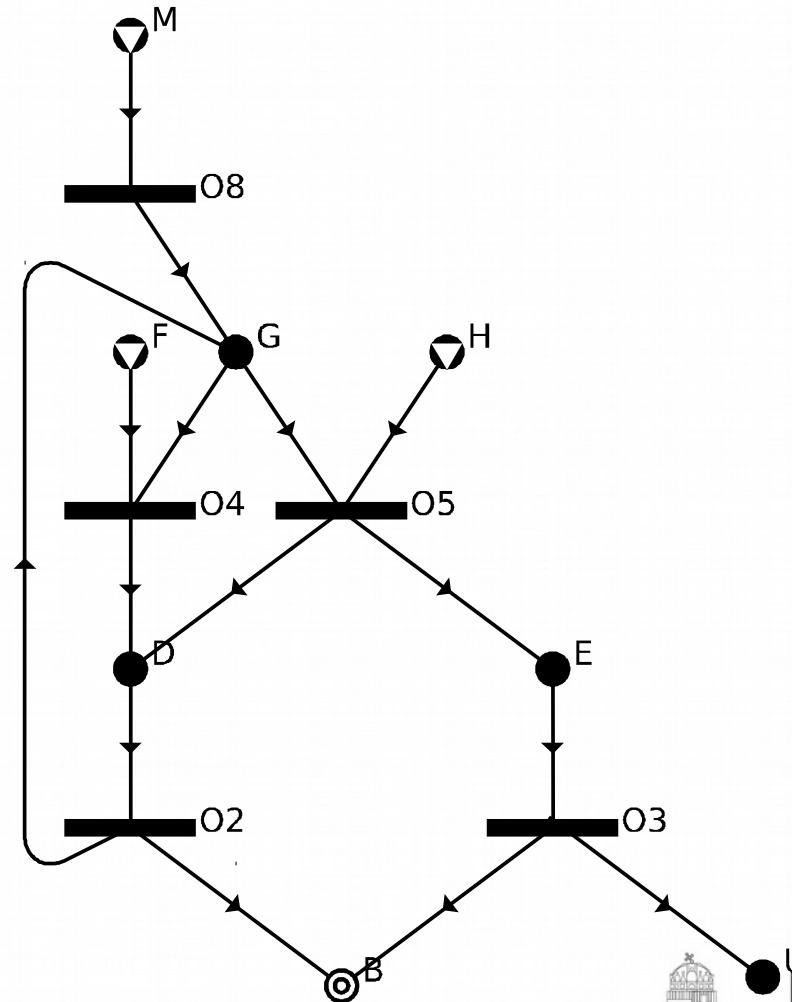
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



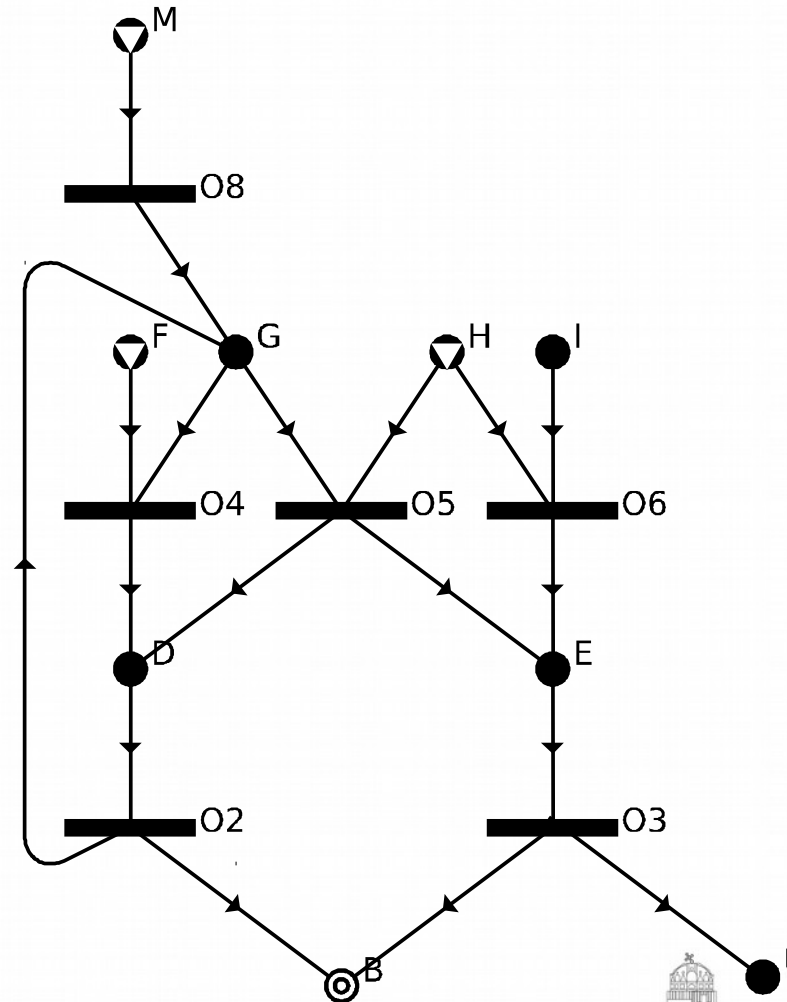
Structure after the third iteration of loop Ip7 (x=G)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



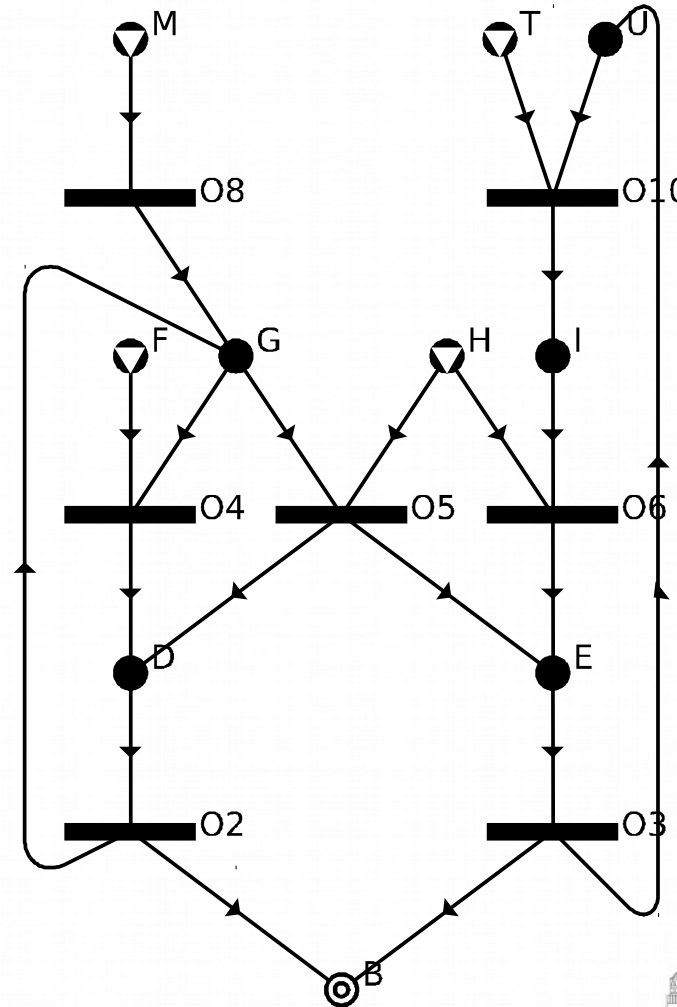
Structure after the fourth iteration of loop Ip7 (x=E)



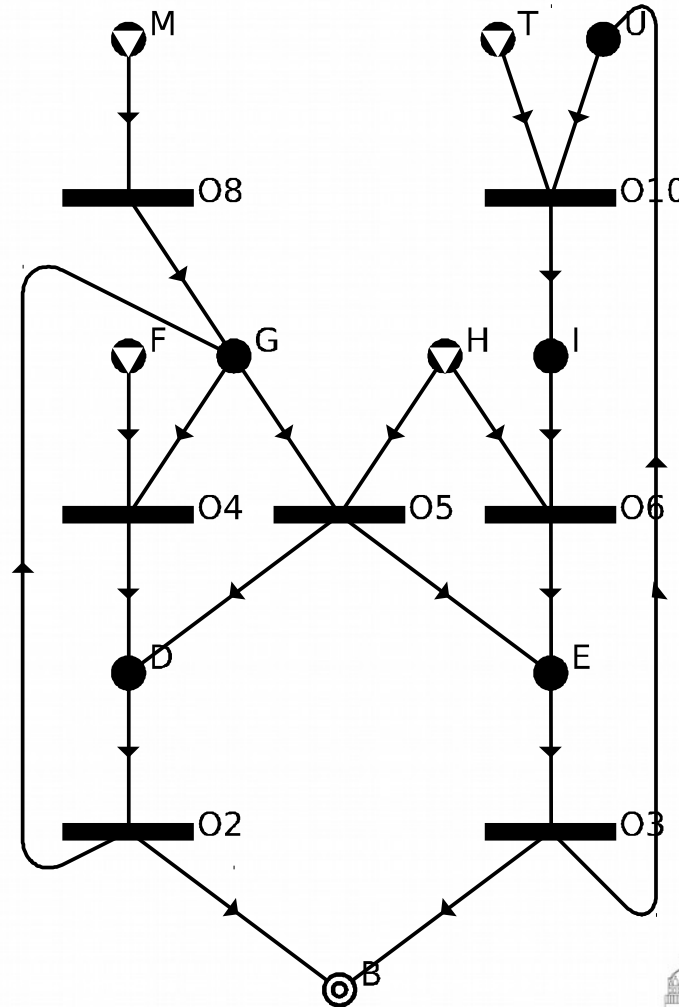
Structure after the fifth iteration of loop lp7 (x=1)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Output of algorithm MSG: The Maximal Structure



III.4 Algorithmic Generation of the Solution Structures

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Decision-mapping

- The axioms are not in procedural form to generate process structures: additional tool is required
- Decision-mapping is a novel mathematical notion to render the complex decisions in process synthesis consistent and complete.

Formal Definition: Decision Mapping

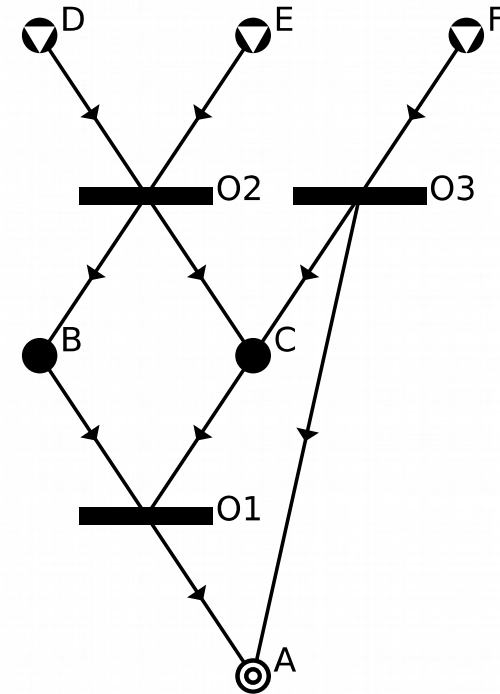
- Mapping or function is a subset of a Cartesian product of domain D and range R .
- Function f is a set of pairs (x, y) where $x \in D$ and $y = f(x) \in R$; this set of pairs is denoted by $f[D]$.
- Let Δ be a mapping from M to the set of subsets of O , i.e., $\Delta[M] \subseteq M \times \wp(O)$. This mapping determines the set of operating units producing material X for any $X \in M$.
- $\Delta(X) = \{(\alpha, \beta) : (\alpha, \beta) \in O \text{ and } X \in \beta\}$ where m is a subset of M X is an element of m .
- $\delta[m] = \{(X, \delta(X)) : X \in m\}$ is a decision mapping on m if $\delta(X)$ is a subset of $\Delta(X)$ for each $X \in m$.

Decision Mapping: Example

$$\Delta(A) = \{ (\{B, C\}, \{A\}), (\{F\}, \{A, C\}) \}$$

$$\Delta(B) = \{ (\{D, E\}, \{B, C\}) \}$$

$$\Delta(C) = \{ (\{D, E\}, \{B, C\}), (\{F\}, \{A, C\}) \}$$

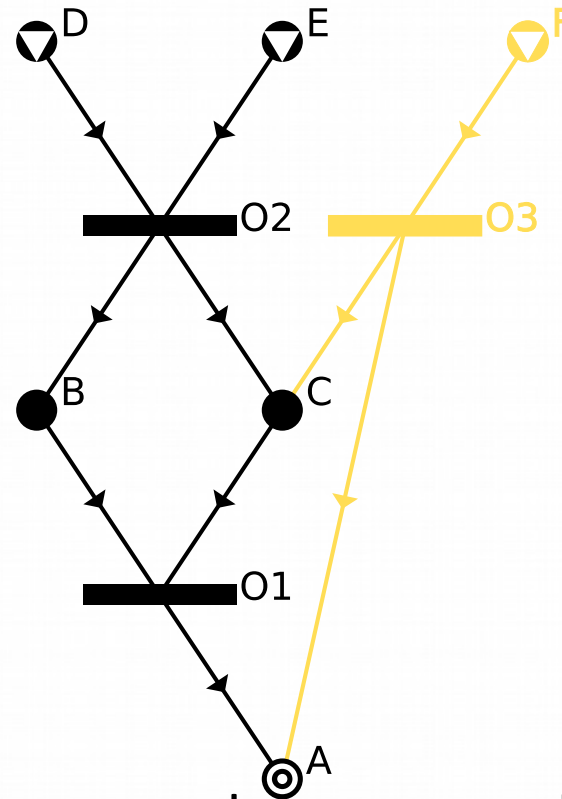


Maximal decision mapping Δ represents the whole structure where $\Delta[\{A, B, C, D, E, F\}] = \{(A, \Delta(A)), (B, \Delta(B)), (C, \Delta(C)), (D, \Delta(D)), (E, \Delta(E)), (F, \Delta(F))\}$

Decision Mapping: Example Cont'd

$$\delta(A) = \{ (\{B, C\}, \{A\}) \}$$

$$\delta(B) = \{ (\{D, E\}, \{B, C\}) \}$$



Decision mapping δ_1 represents a substructure where

$$\delta_1[\{A, B\}] = \{(A, \delta_1(A)), (B, \delta_1(B))\}$$

Algorithm SSG for Generating All Solution-structures of a Synthesis Problem

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- Input:
Maximal structure
- Output:
All solution-structures of the synthesis problem

Algorithm SSG for Generating All Solution-structures of a Synthesis Problem

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

input: $M, P, R, \Delta[M]$;

comment: $P, R, \Delta[M]$ belong to synthesis problem (P, R, O) , where

$P \subseteq M, R \subseteq M, P \cap R = \emptyset, \Delta(x) = \{(\alpha, \beta) | (\alpha, \beta) \in O \ \& \ x \in \beta\}, \Delta(x) = \emptyset \Leftrightarrow x \in R,$

$\Delta[M] = \{(x, \Delta(x)) | x \in M\}, \delta[m]$ is a decision-mapping on (M, O) ;

output: all solution-structures of synthesis problem (P, R, O) ;

global variables: $R, \Delta[M]$;

begin

if $P = \emptyset$ **then stop;**

SSG(P, \emptyset, \emptyset)

end

Algorithm SSG for Generating All Solution-structures of a Synthesis Problem

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

```
procedure SSG( p, m,  $\delta[m]$  ) begin  
  if  $p = \emptyset$  then begin  
    write  $\delta[m]$ ; comment:  $\delta[m]$  defines a solution-structure;  
    return;  
  end  
  let  $x \in p$ ;  
   $C := \wp(\Delta(x)) \setminus \{\emptyset\}$ ;  
  for all  $c \in C$  do begin  
    if  $\forall y \in m, c \cap (\Delta(x) \setminus \delta(y)) = \emptyset$  and  $(\Delta(x) \setminus c) \cap \delta(y) = \emptyset$  then begin  
       $\delta[m \cup \{x\}] := \delta[m] \cup \{(x, c)\}$ ;  
      SSG(  $(p \cup \Psi^{-1}(c)) \setminus (R \cup m \cup \{x\})$ ,  $m \cup \{x\}$ ,  $\delta[m \cup \{x\}]$ );  
    end  
  end  
  return;  
end
```

Steps of Algorithm SSG for Synthesis Problem PNS1

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és
hozzáférhetőségének együttes javítása
a Pannon Egyetemen

```
procedure SSG( p, m,  $\delta[m]$  ) begin  
  if  $p = \emptyset$  then begin  
    write  $\delta[m]$ ; return;  
  end  
  let  $x \in p$ ;  
   $C := \wp(\Delta(x) \setminus \{\emptyset\})$ ;  
  for all  $c \in C$  do begin  
    if  $\forall y \in m, c \cap (\Delta(x) \setminus \delta(y)) = \emptyset$   
    and  $(\Delta(x) \setminus c) \cap \delta(y) = \emptyset$  then begin  
       $\delta[m \cup \{x\}] := \delta[m] \cup \{(x, c)\}$ ;  
      SSG(  $(p \cup \Psi^{-1}(c)) \setminus (R \cup m \cup \{x\})$ ,  $m \cup \{x\}$ ,  $\delta[m \cup \{x\}]$ );  
    end  
  end  
  return;  
end
```

⇒ **procedure** SSG($p, m, \delta[m]$) $p=\{A\}, m=\emptyset$

begin

if $p = \emptyset$ **then begin write** $\delta[m]$; $p=\{A\}$

return end

let $x \in p$; $p=\{A\}, x=A$;

$C := \emptyset (\Delta(x) \setminus \{\emptyset\}); \Delta(A) = \{1, 2\}$

for all $c \in C$ **do** $C = \{ \{1\}, \{2\}, \{1, 2\} \}, c = \{1\}$

begin

if $\forall y \in m, c \cap (\Delta(x) \setminus \delta(y)) = \emptyset \ \& \ (\Delta(x) \setminus c) \cap \delta(y) = \emptyset$ **true**

$m = \emptyset, c = \{1\}, \Delta(A) = \{1, 2\}$

then

begin

$\delta[m \cup \{x\}] := \delta[m] \cup \{(x, c)\}; m = \emptyset, x = A, c = \{1\}$

SSG($p \cup \Psi^{-1}(c) \setminus (R \cup m \cup \{x\}), m \cup \{x\}, \delta[m \cup \{x\}]$)

$p = \{A\}, \text{mat}^{\text{in}}(\{1\}) = \{C\}, R = \{E, J, G, K, L\}$

$m = \emptyset, x = A$

end

end

return

end

Depth of recursion: 0

$\{1\}^*, \{2\}, \{1, 2\}$

←

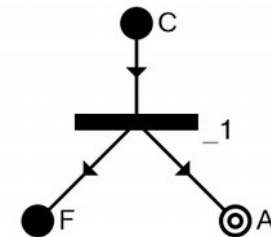
$\delta[\emptyset] = \emptyset$

```

⇒ procedure SSG( p, m,  $\delta[m]$  )  $p=\{C\}$ ,  $m=\{A\}$ 
begin
  if  $p = \emptyset$  then begin write  $\delta[m]$ ;  $p=\{C\}$ 
    return end
  let  $x \in p$ ;  $p=\{C\}$ ,  $x=C$ ;
   $C := \emptyset \setminus (\Delta(x) \setminus \{\emptyset\})$ ;  $\Delta(C)=\{3, 4\}$ 
  for all  $c \in C$  do  $C = \{ \{3\}, \{4\}, \{3, 4\} \}$ ,  $c=\{3\}$ 
    begin
      if  $\forall y \in m, c \cap (\Delta(x) \setminus \delta(y)) = \emptyset \ \& \ (\Delta(x) \setminus c) \cap \delta(y) = \emptyset$  true
         $m=\{A\}$ ,  $c=\{3\}$ ,  $\Delta(C)=\{3, 4\}$ 
          then
            begin
               $\delta[m \cup \{x\}] := \delta[m] \cup \{(x, c)\}$ ;  $m=\{A\}$ ,  $x=C$ ,  $c=\{3\}$ 
              SSG( $p \cup \Psi^-(c) \setminus (R \cup m \cup \{x\})$ ,  $m \cup \{x\}$ ,  $\delta[m \cup \{x\}]$ )
               $p=\{C\}$ ,  $\text{mat}^{\text{in}}(\{3\}) = \{E, F\}$ ,  $R = \{E, J, G, K, L\}$ 
               $m=\{A\}$ ,  $x=C$ 
            end
          end
        end
      end
    end
  return
end

```

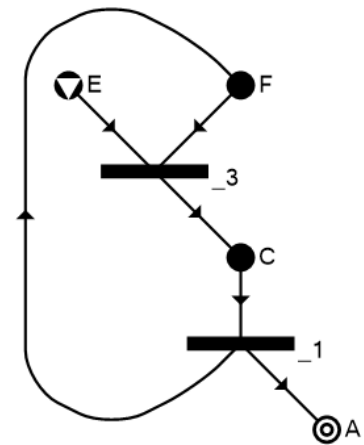
Depth of recursion: 1

 $\{1\}^*$, $\{2\}$, $\{1, 2\}$ $\{3\}^*$, $\{4\}$, $\{3, 4\}$  $\delta[\{A\}]$

```

⇒ procedure SSG( p, m,  $\delta[m]$  )  $p=\{F\}$ ,  $m=\{A, C\}$ 
  begin
  if  $p = \emptyset$  then begin write  $\delta[m]$ ;  $p=\{F\}$ 
    return end
  let  $x \in p$ ;  $p=\{F\}$ ,  $x=F$ ;
   $C := \emptyset (\Delta(x)) \setminus \{\emptyset\}$ ;  $\Delta(F)=\{1, 6\}$ 
  for all  $c \in C$  do  $C=\{ \{1\}, \{6\}, \{1, 6\} \}$ ,  $c=\{1\}$ 
    begin
    if  $\forall y \in m, c \cap (\Delta(x) \setminus \delta(y)) = \emptyset \ \& \ (\Delta(x) \setminus c) \cap \delta(y) = \emptyset$  true
       $m=\{A, C\}$ ,  $c=\{1\}$ ,  $\Delta(F)=\{1, 6\}$ 
      then
        begin
         $\delta[m \cup \{x\}] := \delta[m] \cup \{(x, c)\}$ ;  $m=\{A, C\}$ ,  $x=F$ ,  $c=\{1\}$ 
        SSG( $p \cup \Psi^-(c) \setminus (R \cup m \cup \{x\})$ ,  $m \cup \{x\}$ ,  $\delta[m \cup \{x\}]$ )
         $p=\{F\}$ ,  $\text{mat}^{\text{in}}(\{1\}) = \{C\}$ ,  $R=\{E, J, G, K, L\}$ 
         $m=\{A, C\}$ ,  $x=F$ 
        end
      end
    end
  return
end
  
```

Depth of recursion: 2

 $\{1\}^*$, $\{2\}$, $\{1, 2\}$ $\{3\}^*$, $\{4\}$, $\{3, 4\}$ $\{1\}^*$, $\{6\}$, $\{1, 6\}$  $\delta[\{A, C\}]$

```

⇒ procedure SSG( p, m,  $\delta[m]$  )  $p=\emptyset, m=\{A, C, F\}$ 
  begin
  if  $p = \emptyset$  then begin write  $\delta[m]$ ;  $p=\emptyset$ 
  ← return end
  let  $x \in p$ ;
   $C := \emptyset (\Delta(x)) \setminus \{\emptyset\}$ ;
  for all  $c \in C$  do
    begin
    if  $\forall y \in m, c \cap (\Delta(x) \setminus \delta(y)) = \emptyset \ \& \ (\Delta(x) \setminus c) \cap \delta(y) = \emptyset$ 
    then
      begin
       $\delta[m \cup \{x\}] := \delta[m] \cup \{(x, c)\}$ ;
      SSG( $p \cup \Psi^-(c) \setminus (R \cup m \cup \{x\})$ ,  $m \cup \{x\}$ ,  $\delta[m \cup \{x\}]$ )
      end
    end
  end
  return
end

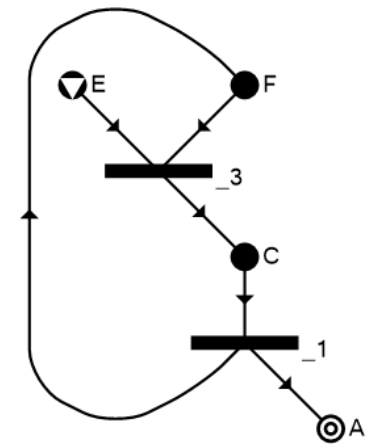
```

Depth of recursion: 3

$\{1\}^*, \{2\}, \{1, 2\}$

$\{3\}^*, \{4\}, \{3, 4\}$

$\{1\}^*, \{6\}, \{1, 6\}$



$\delta[\{A, C, F\}]$

Solution 1

```

procedure SSG( p, m,  $\delta[m]$  ) p={F}, m={A, C}
begin
if p =  $\emptyset$  then begin write  $\delta[m]$ ; p={F}
    return end
let x $\in$ p; p={F}, x=F;
C:=  $\emptyset(\Delta(x)) \setminus \{\emptyset\}$ ;  $\Delta(F) = \{1, 6\}$ 
for all c $\in$ C do C= { {1}, {6}, {1, 6} }, c={6}
    begin
if  $\forall y \in m, c \cap (\Delta(x) \setminus \delta(y)) = \emptyset \ \& \ (\Delta(x) \setminus c) \cap \delta(y) = \emptyset$  false
      m={A, C}, c={6},  $\Delta(F) = \{1, 6\}$ 
      then
        begin
           $\delta[m \cup \{x\}] := \delta[m] \cup \{(x, c)\}$ ;
          SSG(p $\cup$  $\Psi^-(c) \setminus (R \cup m \cup \{x\})$ , m $\cup$ {x},  $\delta[m \cup \{x\}]$ )
        end
      end
    end
return
end

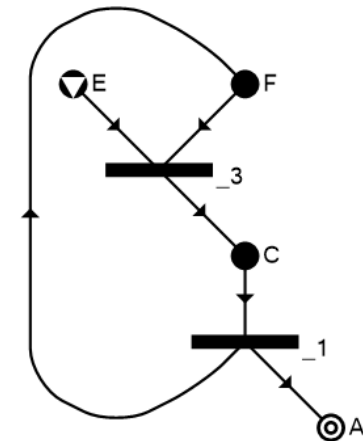
```

Depth of recursion: 2

{1}^{*}, {2}, {1, 2}

{3}^{*}, {4}, {3, 4}

{1}, {6}^{*}, {1, 6}



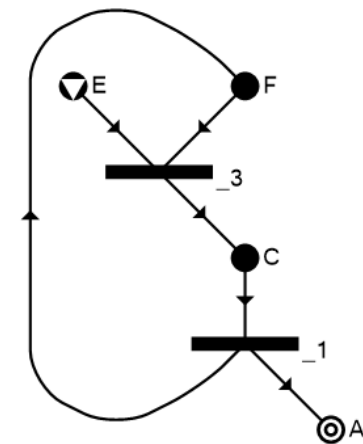
$\delta[\{A, C\}]$


```

procedure SSG( p, m,  $\delta[m]$  ) p={F}, m={A, C}
begin
if p =  $\emptyset$  then begin write  $\delta[m]$ ; p={F}
    return end
let  $x \in p$ ; p={F}, x=F;
C:=  $\emptyset \setminus (\Delta(x) \setminus \{\emptyset\})$ ;  $\Delta(F) = \{1, 6\}$ 
for all  $c \in C$  do C={ {1}, {6}, {1, 6} }, c={1, 6}
    begin
if  $\forall y \in m, c \cap (\Delta(x) \setminus \delta(y)) = \emptyset \ \& \ (\Delta(x) \setminus c) \cap \delta(y) = \emptyset$  true
      m={A, C}, c={1, 6},  $\Delta(F) = \{1, 6\}$ 
      then
        begin
 $\delta[m \cup \{x\}] := \delta[m] \cup \{(x, c)\}$ ; m={A, C}, x=F, c={1, 6}
SSG( $p \cup \Psi^{-1}(c) \setminus (R \cup m \cup \{x\})$ ,  $m \cup \{x\}$ ,  $\delta[m \cup \{x\}]$ )
p={F},  $\text{mat}^{\text{in}}(\{1, 6\}) = \{C, J\}$ , R={E, J, G, K, L}
m={A, C}, x=F
        end
      end
    end
return
end

```

Depth of recursion: 2

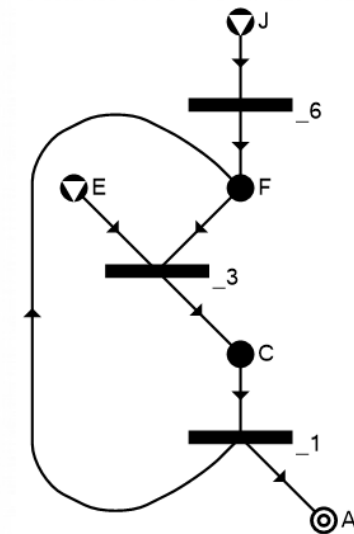
 $\{1\}^*, \{2\}, \{1, 2\}$ $\{3\}^*, \{4\}, \{3, 4\}$ $\{1\}, \{6\}, \{1, 6\}^*$  $\delta[\{A, C\}]$

```

⇒ procedure SSG( p, m,  $\delta[m]$  )  $p=\emptyset, m=\{A, C, F\}$ 
begin
if  $p = \emptyset$  then begin write  $\delta[m]$ ;  $p=\emptyset$ 
← return end
let  $x \in p$ ;
 $C := \emptyset(\Delta(x)) \setminus \{\emptyset\}$ ;
for all  $c \in C$  do
begin
if  $\forall y \in m, c \cap (\Delta(x) \setminus \delta(y)) = \emptyset \ \& \ (\Delta(x) \setminus c) \cap \delta(y) = \emptyset$ 
then
begin
 $\delta[m \cup \{x\}] := \delta[m] \cup \{(x, c)\}$ ;
SSG( $p \cup \Psi^-(c) \setminus (R \cup m \cup \{x\})$ ,  $m \cup \{x\}$ ,  $\delta[m \cup \{x\}]$ )
end
end
return
end

```

Depth of recursion: 3

 $\{1\}^*, \{2\}, \{1, 2\}$ $\{3\}^*, \{4\}, \{3, 4\}$ $\{1\}, \{6\}, \{1, 6\}^*$  $\delta[\{A, C, F\}]$

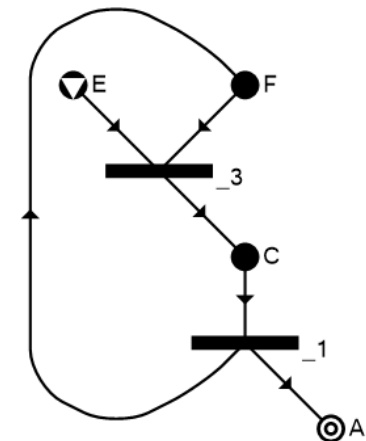
Solution 2

```

procedure SSG( p, m,  $\delta[m]$  )  p={F}, m={A, C}
begin
if p =  $\emptyset$  then begin write  $\delta[m]$ ;  p={F}
      return end
let  $x \in p$ ;  p={F}, x=F;
  C:=  $\emptyset \setminus (\Delta(x) \setminus \{\emptyset\})$ ;   $\Delta(F) = \{1, 6\}$ 
for all  $c \in C$  do  C= { {1}, {6}, {1, 6} }
  begin
    if  $\forall y \in m, c \cap (\Delta(x) \setminus \delta(y)) = \emptyset \ \& \ (\Delta(x) \setminus c) \cap \delta(y) = \emptyset$ 
      then
        begin
           $\delta[m \cup \{x\}] := \delta[m] \cup \{(x, c)\}$ ;
          SSG( $p \cup \Psi^-(c) \setminus (R \cup m \cup \{x\})$ ,  $m \cup \{x\}$ ,  $\delta[m \cup \{x\}]$ )
        end
      end
    end
  return
end

```

Depth of recursion: 2

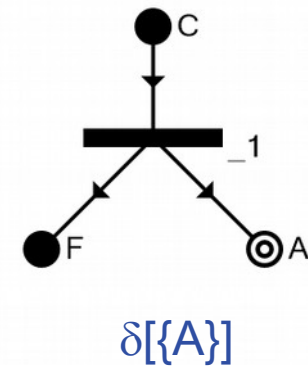
 $\{1\}^*$, {2}, {1, 2} $\{3\}^*$, {4}, {3, 4}{1}, {6}, $\{1, 6\}^*$  $\delta[\{A, C\}]$

```

procedure SSG( p, m,  $\delta[m]$  ) p={C}, m={A}
begin
if p =  $\emptyset$  then begin write  $\delta[m]$ ; p={C}
    return end
let x $\in$ p; p={C}, x=C;
C:=  $\wp(\Delta(x)) \setminus \{\emptyset\}$ ;  $\Delta(C)=\{3, 4\}$ 
for all c $\in$ C do C={ {3}, {4}, {3, 4} }, c={4}
    begin
if  $\forall y \in m, c \cap (\Delta(x) \setminus \delta(y)) = \emptyset \ \& \ (\Delta(x) \setminus c) \cap \delta(y) = \emptyset$  true
      m={A}, c={4},  $\Delta(C)=\{3, 4\}$ 
      then
        begin
 $\delta[m \cup \{x\}] := \delta[m] \cup \{(x, c)\}$ ; m={A}, x=C, c={4}
        SSG(p $\cup$  $\Psi^{-1}(c) \setminus (R \cup m \cup \{x\})$ , m $\cup$ {x},  $\delta[m \cup \{x\}]$ )
        p={C},  $\text{mat}^{\text{in}}(\{4\}) = \{F, G\}$ , R={E, J, G, K, L}
        m={A}, x=C
        end
      end
    end
return
end

```

Depth of recursion: 1

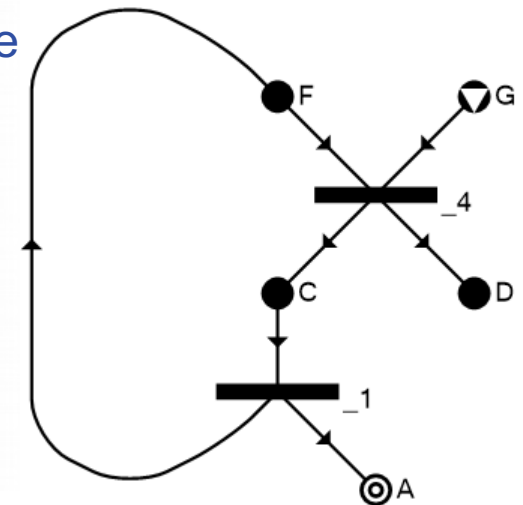
{1}^{*}, {2}, {1, 2}**{3}**, **{4}**^{*}, {3, 4}

```

⇒ procedure SSG( p, m,  $\delta[m]$  )  $p=\{F\}$ ,  $m=\{A, C\}$ 
begin
if  $p = \emptyset$  then begin write  $\delta[m]$ ;  $p=\{F\}$ 
return end
let  $x \in p$ ;  $p=\{F\}$ ,  $x=F$ ;
 $C := \emptyset (\Delta(x)) \setminus \{\emptyset\}$ ;  $\Delta(F)=\{1, 6\}$ 
for all  $c \in C$  do  $C=\{ \{1\}, \{6\}, \{1, 6\} \}$ ,  $c=\{1\}$ 
begin
if  $\forall y \in m, c \cap (\Delta(x) \setminus \delta(y)) = \emptyset \ \& \ (\Delta(x) \setminus c) \cap \delta(y) = \emptyset$  true
 $m=\{A, C\}$ ,  $c=\{1\}$ ,  $\Delta(F)=\{1, 6\}$ 
then
begin
 $\delta[m \cup \{x\}] := \delta[m] \cup \{(x, c)\}$ ;  $m=\{A, C\}$ ,  $x=F$ ,  $c=\{1\}$ 
SSG( $p \cup \Psi^{-1}(c) \setminus (R \cup m \cup \{x\})$ ,  $m \cup \{x\}$ ,  $\delta[m \cup \{x\}]$ )
 $p=\{F\}$ ,  $\text{mat}^{\text{in}}(\{1\}) = \{C\}$ ,  $R=\{E, J, G, K, L\}$ 
 $m=\{A, C\}$ ,  $x=F$ 
end
end
return
end

```

Depth of recursion: 2

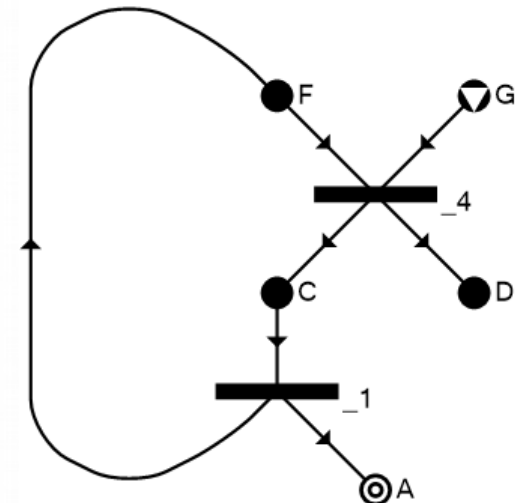
 $\{1\}^*$, $\{2\}$, $\{1, 2\}$ $\{3\}$, $\{4\}^*$, $\{3, 4\}$ $\{1\}^*$, $\{6\}$, $\{1, 6\}$  $\delta[\{A, C\}]$

```

⇒ procedure SSG( p, m,  $\delta[m]$  )  $p=\emptyset, m=\{A, C, F\}$ 
  begin
  if  $p = \emptyset$  then begin write  $\delta[m]$ ;  $p=\emptyset$ 
  ⇐ return end
  let  $x \in p$ ;
   $C := \wp(\Delta(x)) \setminus \{\emptyset\}$ ;
  for all  $c \in C$  do
    begin
    if  $\forall y \in m, c \cap \delta(y) = \emptyset \ \& \ (\Delta(x) \setminus c) \cap \delta(y) = \emptyset$ 
    then
      begin
       $\delta[m \cup \{x\}] := \delta[m] \cup \{(x, c)\}$ ;
      SSG( $p \cup \Psi^-(c) \setminus (R \cup m \cup \{x\})$ ,  $m \cup \{x\}$ ,  $\delta[m \cup \{x\}]$ )
      end
    end
  end
  return
end

```

Depth of recursion: 3

 $\{1\}^*, \{2\}, \{1, 2\}$ $\{3\}, \{4\}^*, \{3, 4\}$ $\{1\}^*, \{6\}, \{1, 6\}$ 

$\delta[\{A, C, F\}]$
Solution 3

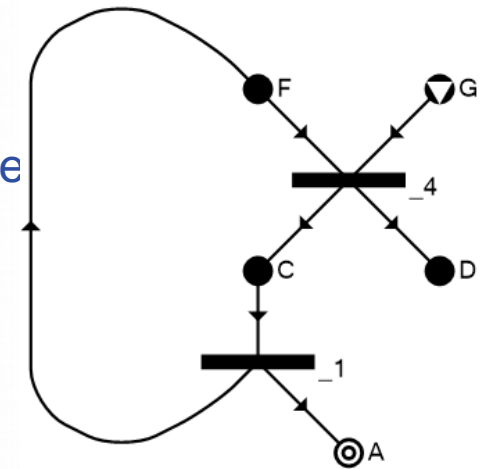
```

procedure SSG( p, m,  $\delta[m]$  ) p={F}, m={A, C}
begin
if p =  $\emptyset$  then begin write  $\delta[m]$ ; p={F}
    return end
let x $\in$ p; p={F}, x=F;
C:=  $\emptyset(\Delta(x)) \setminus \{\emptyset\}$ ;  $\Delta(F)=\{1, 6\}$ 
for all c $\in$ C do C={ {1}, {6}, {1, 6} }, c={6}
    begin
if  $\forall y \in m, c \cap (\Delta(x) \setminus \delta(y)) = \emptyset \ \& \ (\Delta(x) \setminus c) \cap \delta(y) = \emptyset$  false
      m={A, C}, c={6},  $\Delta(F)=\{1, 6\}$ 
    then
      begin
 $\delta[m \cup \{x\}] := \delta[m] \cup \{(x, c)\}$ ;
SSG( $p \cup \Psi^{-1}(c) \setminus (R \cup m \cup \{x\})$ ,  $m \cup \{x\}$ ,  $\delta[m \cup \{x\}]$ )
      end
    end
return
end

```

⇒

Depth of recursion: 2

 $\{1\}^*$, {2}, {1, 2}{3}, $\{4\}^*$, {3, 4}{1}, $\{6\}^*$, {1, 6} $\delta[\{A, C\}]$

```

procedure SSG( p, m,  $\delta[m]$  ) p={F}, m={A, C}
begin
if p =  $\emptyset$  then begin write  $\delta[m]$ ; p={F}
    return end
let x $\in$ p; p={F}, x=F;
C:=  $\emptyset$  ( $\Delta(x)$ )\{\emptyset\};  $\Delta(F)$ ={1, 6}
for all c $\in$ C do C={ {1}, {6}, {1, 6} }, c={1, 6}
    begin
if  $\forall y \in m, c \cap (\Delta(x) \setminus \delta(y)) = \emptyset$  &  $(\Delta(x) \setminus c) \cap \delta(y) = \emptyset$  true
      m={A, C}, c={1, 6},  $\Delta(F)$ ={1, 6}
    then
      begin
 $\delta[m \cup \{x\}] := \delta[m] \cup \{(x, c)\}$ ; m={A, C}, x=F, c={1, 6}
SSG(p $\cup$  $\Psi$ -(c))\( $R \cup m \cup \{x\}$ ), m $\cup$ {x},  $\delta[m \cup \{x\}]$ )
      p={F}, matin ({1, 6}) = {C, J}, R={E, J, G, K, L}
      m={A, C}, x=F
    end
  end
return
end

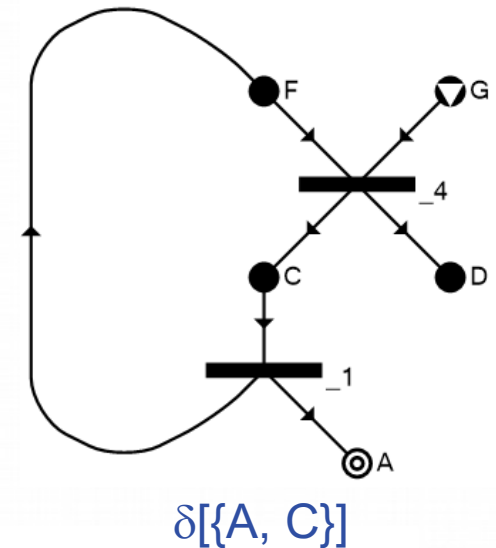
```

Depth of recursion: 2

{1}* , {2}, {1, 2}

{3}, {4}* , {3, 4}

{1}, {6}, {1, 6}*




```

⇒ procedure SSG( p, m,  $\delta[m]$  )  $p=\emptyset, m=\{A, C, F\}$ 
  begin
  if  $p = \emptyset$  then begin write  $\delta[m]$ ;  $p=\emptyset$ 
  ← return end
  let  $x \in p$ ;
   $C := \emptyset (\Delta(x)) \setminus \{\emptyset\}$ ;
  for all  $c \in C$  do
    begin
    if  $\forall y \in m, c \cap (\Delta(x) \setminus \delta(y)) = \emptyset$  &  $(\Delta(x) \setminus c) \cap \delta(y) = \emptyset$ 
    then
      begin
       $\delta[m \cup \{x\}] := \delta[m] \cup \{(x, c)\}$ ;
      SSG( $p \cup \Psi^-(c) \setminus (R \cup m \cup \{x\})$ ,  $m \cup \{x\}$ ,  $\delta[m \cup \{x\}]$ )
      end
    end
  end
  return
end

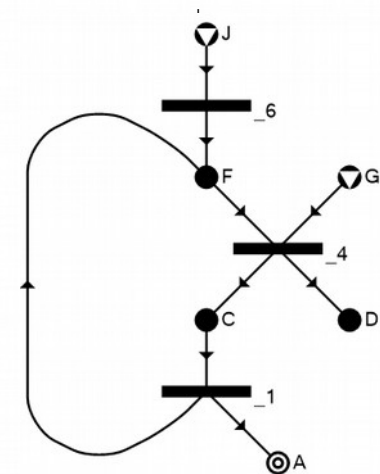
```

Depth of recursion: 3

$\{1\}^*, \{2\}, \{1, 2\}$

$\{3\}, \{4\}^*, \{3, 4\}$

$\{1\}, \{6\}, \{1, 6\}^*$



$\delta[\{A, C, F\}]$

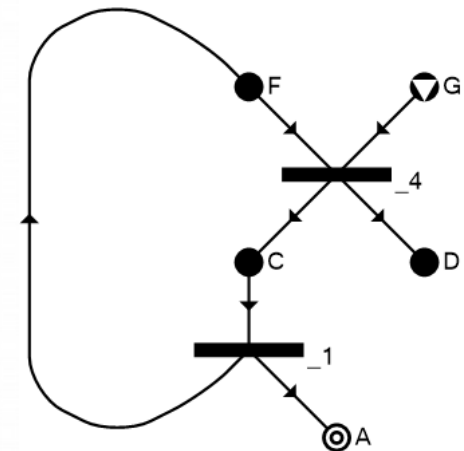
Solution 4

```

procedure SSG( p, m,  $\delta[m]$  ) p={F}, m={A, C}
begin
if p =  $\emptyset$  then begin write  $\delta[m]$ ; p={F}
    return end
let x $\in$ p; p={F}, x=F;
C:=  $\emptyset(\Delta(x)) \setminus \{\emptyset\}$ ;  $\Delta(F) = \{1, 6\}$ 
for all c $\in$ C do C={ {1}, {6}, {1, 6} }
    begin
if  $\forall y \in m, c \cap (\Delta(x) \setminus \delta(y)) = \emptyset \ \& \ (\Delta(x) \setminus c) \cap \delta(y) = \emptyset$ 
      then
        begin
 $\delta[m \cup \{x\}] := \delta[m] \cup \{(x, c)\}$ ;
SSG( $p \cup \Psi^{-1}(c) \setminus (R \cup m \cup \{x\})$ ,  $m \cup \{x\}$ ,  $\delta[m \cup \{x\}]$ )
        end
    end
 $\Rightarrow$  end
 $\Leftarrow$  return
end

```

Depth of recursion: 2

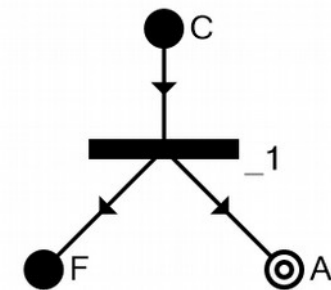
 $\{1\}^*$, $\{2\}$, $\{1, 2\}$ $\{3\}$, $\{4\}^*$, $\{3, 4\}$ $\{1\}$, $\{6\}$, $\{1, 6\}^*$  $\delta[\{A, C\}]$

```

procedure SSG( p, m,  $\delta[m]$  ) p={C}, m={A}
begin
if p =  $\emptyset$  then begin write  $\delta[m]$ ; p={C}
    return end
let  $x \in p$ ; p={C}, x=C;
C:=  $\emptyset \setminus (\Delta(x) \setminus \{\emptyset\})$ ;  $\Delta(C) = \{3, 4\}$ 
for all  $c \in C$  do C={ {3}, {4}, {3, 4} }, c={3, 4}
    begin
if  $\forall y \in m, c \cap (\Delta(x) \setminus \delta(y)) = \emptyset \ \& \ (\Delta(x) \setminus c) \cap \delta(y) = \emptyset$  true
      m={A}, c={3, 4},  $\Delta(C) = \{3, 4\}$ 
      then
        begin
 $\delta[m \cup \{x\}] := \delta[m] \cup \{(x, c)\}$ ; m={A}, x=C, c={3, 4}
 $\Leftarrow$  SSG( $p \cup \Psi^{-1}(c) \setminus (R \cup m \cup \{x\})$ ,  $m \cup \{x\}$ ,  $\delta[m \cup \{x\}]$ )
          p={C},  $\text{mat}^{\text{in}}(\{3, 4\}) = \{E, F, G\}$ , R={E, J, G, K, L}
          m={A}, x=C
 $\Rightarrow$         end
        end
      return
    end

```

Depth of recursion: 1

 $\{1\}^*, \{2\}, \{1, 2\}$ $\{3\}, \{4\}, \{3, 4\}^*$  $\delta[\{A\}]$

```

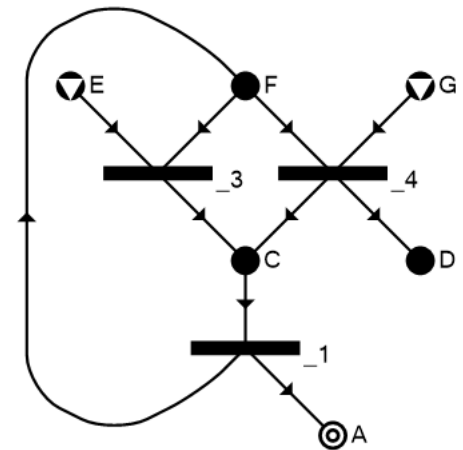
⇒ procedure SSG( p, m, δ[m] ) p={F}, m={A, C}
  begin
  if p = ∅ then begin write δ[m]; p={F}
    return end
  let x∈p; p={F}, x=F;
  C:= ∅(Δ(x))\{∅}; Δ(F)={1, 6}
  for all c∈C do C={ {1}, {6}, {1, 6} }, c={1}
    begin
    if ∀y∈m, c∩(Δ(x)\δ(y)) = ∅ & (Δ(x)\c)∩δ(y) = ∅ true
      m={A, C}, c={1}, Δ(F)={1, 6}
    then
      begin
      δ[m∪{x}]:= δ[m]∪{(x, c)}; m={A, C}, x=F, c={1}
      SSG(p∪Ψ⁻(c))\((R∪m∪{x}), m∪{x}, δ[m∪{x}])
      p={F}, matin ({1}) = {C}, R={E, J, G, K, L}
      m={A, C}, x=F
    end
  end
  return
end
  
```

Depth of recursion: 2

{1}* , {2}, {1, 2}

{3}, {4}, {3, 4}*

{1}* , {6}, {1, 6}



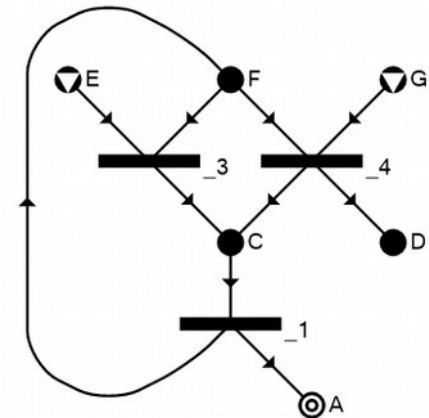
δ[{A, C}]

```

⇒ procedure SSG( p, m,  $\delta[m]$  )  $p=\emptyset, m=\{A, C, F\}$ 
begin
if  $p = \emptyset$  then begin write  $\delta[m]$ ;  $p=\emptyset$ 
← return end
let  $x \in p$ ;
 $C := \emptyset(\Delta(x)) \setminus \{\emptyset\}$ ;
for all  $c \in C$  do
begin
if  $\forall y \in m, c \cap (\Delta(x) \setminus \delta(y)) = \emptyset \ \& \ (\Delta(x) \setminus c) \cap \delta(y) = \emptyset$ 
then
begin
 $\delta[m \cup \{x\}] := \delta[m] \cup \{(x, c)\}$ ;
SSG( $p \cup \Psi^{-1}(c) \setminus (R \cup m \cup \{x\})$ ,  $m \cup \{x\}$ ,  $\delta[m \cup \{x\}]$ )
end
end
return
end

```

Depth of recursion: 3

 $\{1\}^*, \{2\}, \{1, 2\}$ $\{3\}, \{4\}, \{3, 4\}^*$ $\{1\}^*, \{6\}, \{1, 6\}$  $\delta[\{A, C, F\}]$

Solution 5

```

procedure SSG( p, m,  $\delta[m]$  )  $p=\{F\}$ ,  $m=\{A, C\}$ 
begin
if  $p = \emptyset$  then begin write  $\delta[m]$ ;  $p=\{F\}$ 
    return end
let  $x \in p$ ;  $p=\{F\}$ ,  $x=F$ ;
 $C := \emptyset \setminus (\Delta(x) \setminus \{\emptyset\})$ ;  $\Delta(F)=\{1, 6\}$ 
for all  $c \in C$  do  $C = \{ \{1\}, \{6\}, \{1, 6\} \}$ ,  $c=\{6\}$ 
    begin
if  $\forall y \in m, c \cap (\Delta(x) \setminus \delta(y)) = \emptyset \ \& \ (\Delta(x) \setminus c) \cap \delta(y) = \emptyset$  false
       $m=\{A, C\}$ ,  $c=\{6\}$ ,  $\Delta(F)=\{1, 6\}$ 
      then
        begin
           $\delta[m \cup \{x\}] := \delta[m] \cup \{(x, c)\}$ ;
          SSG( $p \cup \Psi^{-1}(c) \setminus (R \cup m \cup \{x\})$ ,  $m \cup \{x\}$ ,  $\delta[m \cup \{x\}]$ )
        end
      end
    end
return
end

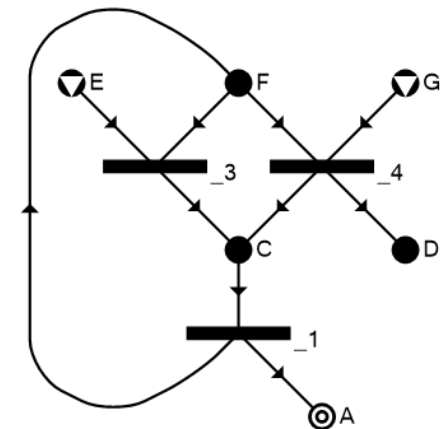
```

Depth of recursion: 2

$\{1\}^*$, $\{2\}$, $\{1, 2\}$

$\{3\}$, $\{4\}$, $\{3, 4\}^*$

$\{1\}$, $\{6\}^*$, $\{1, 6\}$



$\delta[\{A, C\}]$

```

procedure SSG( p, m,  $\delta[m]$  )  $p=\{F\}$ ,  $m=\{A, C\}$ 
begin
if  $p = \emptyset$  then begin write  $\delta[m]$ ;  $p=\{F\}$ 
    return end
let  $x \in p$ ;  $p=\{F\}$ ,  $x=F$ ;
 $C := \emptyset (\Delta(x)) \setminus \{\emptyset\}$ ;  $\Delta(F)=\{1, 6\}$ 
for all  $c \in C$  do  $C = \{ \{1\}, \{6\}, \{1, 6\} \}$ ,  $c = \{1, 6\}$ 
    begin
if  $\forall y \in m, c \cap (\Delta(x) \setminus \delta(y)) = \emptyset$  &  $(\Delta(x) \setminus c) \cap \delta(y) = \emptyset$  true
       $m = \{A, C\}$ ,  $c = \{1, 6\}$ ,  $\Delta(F) = \{1, 6\}$ 
      then
        begin
 $\delta[m \cup \{x\}] := \delta[m] \cup \{(x, c)\}$ ;  $m = \{A, C\}$ ,  $x = F$ ,  $c = \{1, 6\}$ 
          SSG( $p \cup \Psi^-(c) \setminus (R \cup m \cup \{x\})$ ,  $m \cup \{x\}$ ,  $\delta[m \cup \{x\}]$ )
           $p = \{F\}$ ,  $\text{mat}^{\text{in}}(\{1, 6\}) = \{C, J\}$ ,  $R = \{E, J, G, K, L\}$ 
           $m = \{A, C\}$ ,  $x = F$ 
        end
      end
    end
return
end

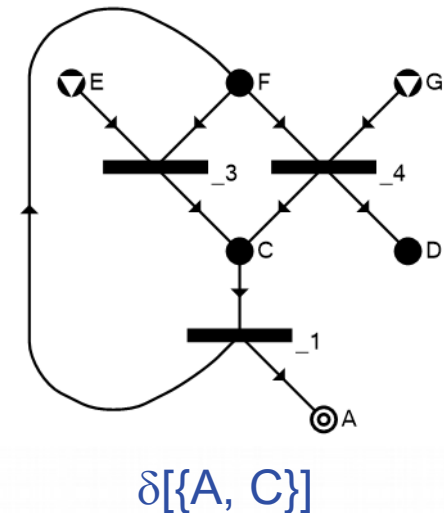
```

Depth of recursion: 2

$\{1\}^*$, $\{2\}$, $\{1, 2\}$

$\{3\}$, $\{4\}$, $\{3, 4\}^*$

$\{1\}$, $\{6\}$, $\{1, 6\}^*$



```

⇒ procedure SSG( p, m,  $\delta[m]$  )  $p=\emptyset, m=\{A, C, F\}$ 
begin
  if  $p = \emptyset$  then begin write  $\delta[m]$ ;  $p=\emptyset$ 
  ⇐ return end
  let  $x \in p$ ;
   $C := \varnothing(\Delta(x)) \setminus \{\emptyset\}$ ;
  for all  $c \in C$  do
    begin
      if  $\forall y \in m, c \cap (\Delta(x) \setminus \delta(y)) = \emptyset \ \& \ (\Delta(x) \setminus c) \cap \delta(y) = \emptyset$ 
      then
        begin
           $\delta[m \cup \{x\}] := \delta[m] \cup \{(x, c)\}$ ;
          SSG( $p \cup \Psi \cdot c$ )  $\setminus (R \cup m \cup \{x\})$ ,  $m \cup \{x\}$ ,  $\delta[m \cup \{x\}]$ )
        end
      end
    end
  return
end

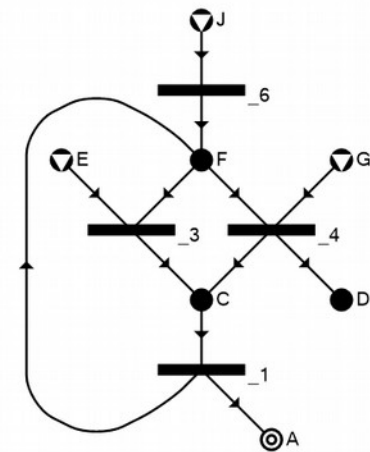
```

Depth of recursion: 3

$\{1\}^*, \{2\}, \{1, 2\}$

$\{3\}, \{4\}, \{3, 4\}^*$

$\{1\}, \{6\}, \{1, 6\}^*$



$\delta[\{A, C, F\}]$

Solution 6


```

procedure SSG( p, m,  $\delta[m]$  )  $p=\{F\}$ ,  $m=\{A, C\}$ 
begin
  if  $p = \emptyset$  then begin write  $\delta[m]$ ;  $p=\{F\}$ 
    return end
  let  $x \in p$ ;  $p=\{F\}$ ,  $x=F$ ;
   $C := \emptyset(\Delta(x)) \setminus \{\emptyset\}$ ;  $\Delta(F)=\{1, 6\}$ 
  for all  $c \in C$  do  $C = \{ \{1\}, \{6\}, \{1, 6\} \}$ 
    begin
      if  $\forall y \in m, c \cap (\Delta(x) \setminus \delta(y)) = \emptyset \ \& \ (\Delta(x) \setminus c) \cap \delta(y) = \emptyset$ 
        then
          begin
             $\delta[m \cup \{x\}] := \delta[m] \cup \{(x, c)\}$ ;
            SSG( $p \cup \Psi^-(c) \setminus (R \cup m \cup \{x\})$ ,  $m \cup \{x\}$ ,  $\delta[m \cup \{x\}]$ )
          end
        end
    end
  return
end

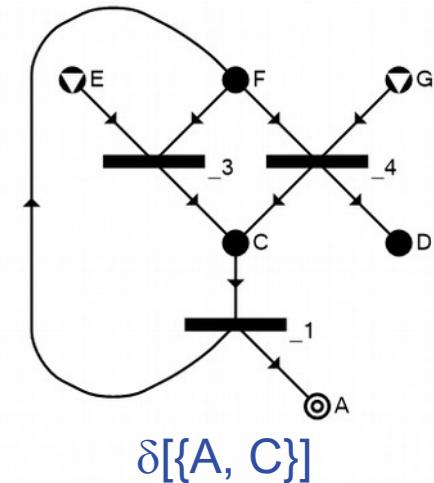
```

Depth of recursion: 2

$\{1\}^*$, $\{2\}$, $\{1, 2\}$

$\{3\}$, $\{4\}$, $\{3, 4\}^*$

$\{1\}$, $\{6\}$, $\{1, 6\}^*$

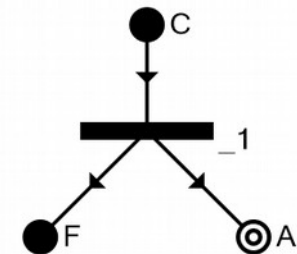


```

procedure SSG( p, m,  $\delta[m]$  )  $p=\{C\}$ ,  $m=\{A\}$ 
begin
if  $p = \emptyset$  then begin write  $\delta[m]$ ;  $p=\{C\}$ 
    return end
let  $x \in p$ ;  $p=\{C\}$ ,  $x=C$ ;
 $C:= \emptyset (\Delta(x)) \setminus \{\emptyset\}$ ;  $\Delta(C)=\{3, 4\}$ 
for all  $c \in C$  do  $C=\{ \{3\}, \{4\}, \{3, 4\} \}$ 
    begin
    if  $\forall y \in m, c \cap (\Delta(x) \setminus \delta(y)) = \emptyset \ \& \ (\Delta(x) \setminus c) \cap \delta(y) = \emptyset$ 
      then
        begin
         $\delta[m \cup \{x\}] := \delta[m] \cup \{(x, c)\}$ ;
        SSG( $p \cup \Psi^-(c) \setminus (R \cup m \cup \{x\})$ ,  $m \cup \{x\}$ ,  $\delta[m \cup \{x\}]$ )
        end
    end
return
end

```

Depth of recursion: 1

 $\{1\}^*$, $\{2\}$, $\{1, 2\}$ $\{3\}$, $\{4\}$, $\{3, 4\}^*$  $\delta[\{A\}]$

procedure SSG(p , m , $\delta[m]$) $p=\{A\}$, $m=\emptyset$

begin

if $p = \emptyset$ **then begin write** $\delta[m]$; $p=\{A\}$

return end

let $x \in p$; $p=\{A\}$, $x=A$;

$C := \emptyset(\Delta(x)) \setminus \{\emptyset\}$; $\Delta(A) = \{1, 2\}$

for all $c \in C$ **do** $C = \{ \{1\}, \{2\}, \{1, 2\} \}$, $c = \{2\}$

begin

if $\forall y \in m, c \cap (\Delta(x) \setminus \delta(y)) = \emptyset$ & $(\Delta(x) \setminus c) \cap \delta(y) = \emptyset$ **true**

$m = \emptyset$, $c = \{2\}$, $\Delta(A) = \{1, 2\}$

then

begin

$\delta[m \cup \{x\}] := \delta[m] \cup \{(x, c)\}$; $m = \emptyset$, $x = A$, $c = \{2\}$

$\text{SSG}(p \cup \Psi^{-1}(c) \setminus (R \cup m \cup \{x\}), m \cup \{x\}, \delta[m \cup \{x\}])$

$p = \{A\}$, $\text{mat}^{\text{in}}(\{2\}) = \{D\}$, $R = \{E, J, G, K, L\}$

$m = \emptyset$, $x = A$

end

end

return

end

Depth of recursion: 0

$\{1\}$, $\{2\}^*$, $\{1, 2\}$

←

⇒

$\delta[\emptyset] = \emptyset$

Recursive Steps of Algorithm SSG

Number of call	Depth of recursion	Parameter p	Parameter m	Parameter $\delta[m]$	Remark
1	0	{A}	\emptyset	\emptyset	Initial call
2	1	{C}	{A}	{{A,{1}}}	
3	2	{F}	{A,C}	{{A,{1}},{C,{3}}}	
4	3	\emptyset	{A,C,F}	{{A,{1}},{C,{3}},{F,{1}}}	Solution #1
5	3	\emptyset	{A,C,F}	{{A,{1}},{C,{3}},{F,{1,6}}}	Solution #2
6	2	{F}	{A,C}	{{A,{1}},{C,{4}}}	
7	3	\emptyset	{A,C,F}	{{A,{1}},{C,{4}},{F,{1}}}	Solution #3
8	3	\emptyset	{A,C,F}	{{A,{1}},{C,{4}},{F,{1,6}}}	Solution #4
9	2	{F}	{A,C}	{{A,{1}},{C,{3,4}}}	
10	3	\emptyset	{A,C,F}	{{A,{1}},{C,{3,4}},{F,{1}}}	Solution #5
11	3	\emptyset	{A,C,F}	{{A,{1}},{C,{3,4}},{F,{1,6}}}	Solution #6
12	1	{D}	{A}	{{A,{2}}}	
13	2	{F}	{A,D}	{{A,{2}},{D,{4}}}	
14	3	\emptyset	{A,D,F}	{{A,{2}},{D,{4}},{F,{6}}}	Solution #7
15	2	{H}	{A,D}	{{A,{2}},{D,{5}}}	
16	3	\emptyset	{A,D,H}	{{A,{2}},{D,{5}},{H,{7}}}	Solution #8

Recursive Steps of Algorithm SSG (Cont'd)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Number of call	Depth of recursion	Parameter p	Parameter m	Parameter $\delta[m]$	Remark
17	2	{F,H}	{A,D}	{{A,{2}},{D,{4,5}}}	
18	3	{H}	{A,D,F}	{{A,{2}},{D,{4,5}},{F,{6}}}	
19	4	\emptyset	{A,D,F,H}	{{A,{2}},{D,{4,5}},{F,{6}},{H,{7}}}	Solution #9
20	1	{C,D}	{A}	{{A,{1,2}}}	
21	2	{D,F}	{A,C}	{{A,{1,2}},{C,{3}}}	
22	3	{F,H}	{A,C,D}	{{A,{1,2}},{C,{3}},{D,{5}}}	
23	4	{H}	{A,C,D,F}	{{A,{1,2}},{C,{3}},{D,{5}},{F,{1}}}	
24	5	\emptyset	{A,C,D,F,H}	{{A,{1,2}},{C,{3}},{D,{5}},{F,{1}},{H,{7}}}	Solution #10
25	4	{H}	{A,C,D,F}	{{A,{1,2}},{C,{3}},{D,{5}},{F,{1,6}}}	
26	5	\emptyset	{A,C,D,F,H}	{{A,{1,2}},{C,{3}},{D,{5}},{F,{1,6}},{H,{7}}}	Solution #11
27	2	{D,F}	{A,C}	{{A,{1,2}},{C,{4}}}	
28	3	{F}	{A,C,D}	{{A,{1,2}},{C,{4}},{D,{4}}}	
29	4	\emptyset	{A,C,D,F}	{{A,{1,2}},{C,{4}},{D,{4}},{F,{1}}}	Solution #12
30	4	\emptyset	{A,C,D,F}	{{A,{1,2}},{C,{4}},{D,{4}},{F,{1,6}}}	Solution #13
31	3	{F,H}	{A,C,D}	{{A,{1,2}},{C,{4}},{D,{4,5}}}	

Recursive Steps of Algorithm SSG (Cont'd)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Number of call	Depth of recursion	Parameter p	Parameter m	Parameter $\delta[m]$	Remark
32	4	{H}	{A,C,D,F}	{{A,{1,2}},{C,{4}},{D,{4,5}},{F,{1}}}	
33	5	\emptyset	{A,C,D,F,H}	{{A,{1,2}},{C,{4}},{D,{4,5}},{F,{1}},{H,{7}}}	Soluton #14
34	4	{H}	{A,C,D,F}	{{A,{1,2}},{C,{4}},{D,{4,5}},{F,{1,6}}}	
35	5	\emptyset	{A,C,D,F,H}	{{A,{1,2}},{C,{4}},{D,{4,5}},{F,{1,6}},{H,{7}}}	Soluton #15
36	2	{D,F}	{A,C}	{{A,{1,2}},{C,{3,4}}}	
37	3	{F}	{A,C,D}	{{A,{1,2}},{C,{3,4}},{D,{4}}}	
38	4	\emptyset	{A,C,D,F}	{{A,{1,2}},{C,{3,4}},{D,{4}},{F,{1}}}	Soluton #16
39	4	\emptyset	{A,C,D,F}	{{A,{1,2}},{C,{3,4}},{D,{4}},{F,{1,6}}}	Soluton #17
40	3	{F,H}	{A,C,D}	{{A,{1,2}},{C,{3,4}},{D,{4,5}}}	
41	4	{H}	{A,C,D,F}	{{A,{1,2}},{C,{3,4}},{D,{4,5}},{F,{1}}}	
42	5	\emptyset	{A,C,D,F,H}	{{A,{1,2}},{C,{3,4}},{D,{4,5}},{F,{1}},{H,{7}}}	Soluton #18
43	4	{H}	{A,C,D,F}	{{A,{1,2}},{C,{3,4}},{D,{4,5}},{F,{1,6}}}	
44	5	\emptyset	{A,C,D,F,H}	{{A,{1,2}},{C,{3,4}},{D,{4,5}},{F,{1,6}},{H,{7}}}	Soluton #19

III.5 Accelerated branch & bound algorithm for solving PNS problems

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

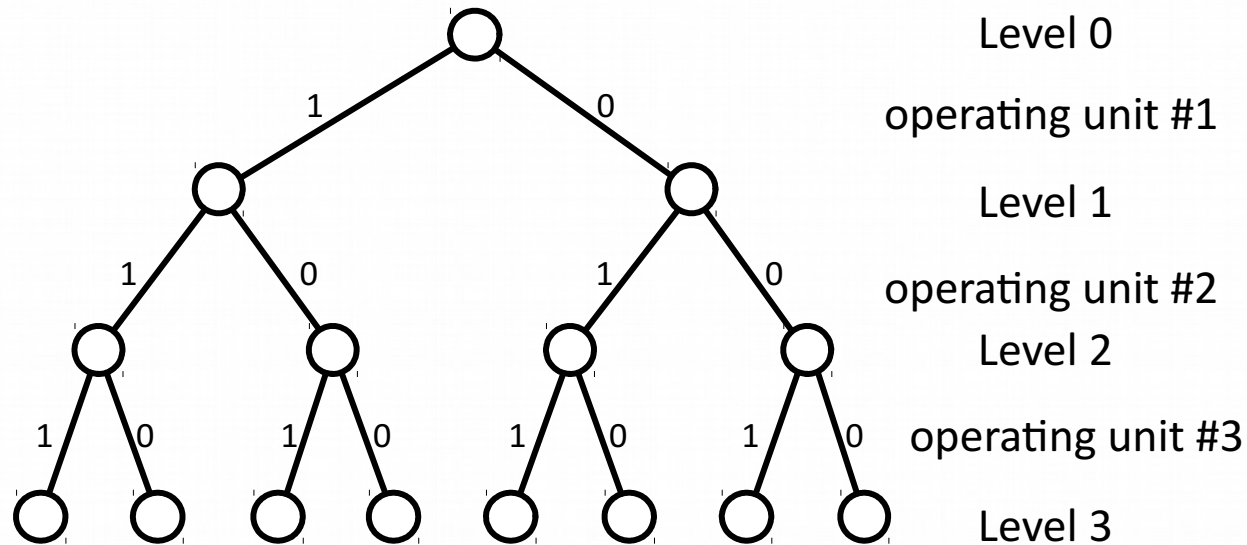
On the Branch-and-bound Algorithm

- Branch-and-bound search is a possible way for solving the MILP or MINLP problems.
- Branch-and-bound generates the optimal solution by solving a system of simplified LP or NLP partial problems by successively partitioning the solution set.
- Suppose that a binary variable expresses the existence or absence of an operating unit (the value is 1 for the former and 0 for the latter).

The Basic Branch-and-bound Search Illustrated on an Enumeration Tree

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

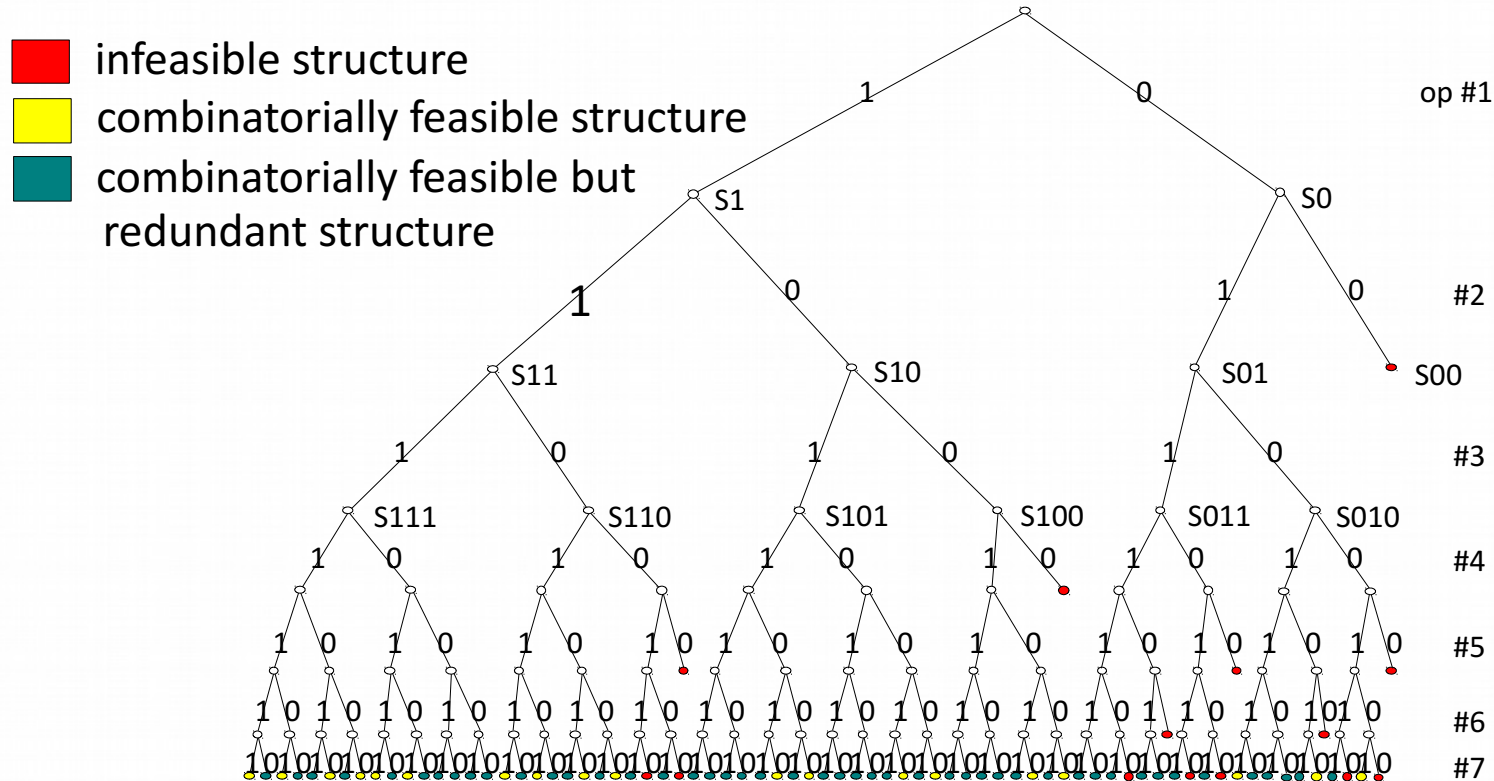


Notation:

- 1 existence or inclusion of the corresponding operating unit
- 0 absence or exclusion of the corresponding operating unit

Illustration of the inefficiency of the basic branch-and-bound algorithm

Worst case with a simple example: Example PNS 1 (7 operating units).



Note: Each node of the tree represents one LP (or NLP) problem.

Note: In the worst case, 157 partial problems are examined to determine the optimal solution which is always among the 19 combinatorially feasible structures.

Example PNS 2

(Industrial synthesis problem with 35 operating units)

Number of partial problems generated by the basic branch-and-bound algorithm:

130 million

Number of combinatorially feasible structures:

3465

Note: The large ratio shows high inefficiency.

The basic branch-and-bound algorithm is inefficient in solving a process synthesis problem because:

- it leads to a large number of partial problems,
- each partial problem has an unnecessarily, large number of free variables.

Accelerated Branch and Bound Algorithm

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- Reduce the size of an individual subproblem through exclusion of those operating units that should not be included in any feasible solution of the subproblem
- Speeds up the generation of the optimal solution by minimizing the number of subproblems to be solved



Illustrative Example for Branching by ABB

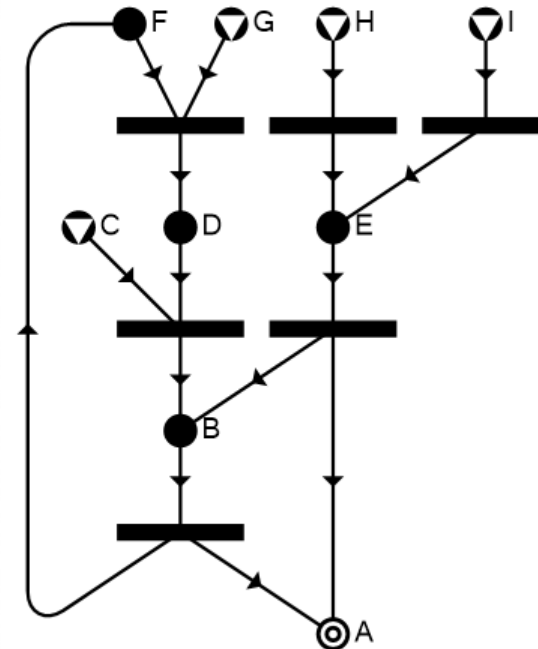
EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

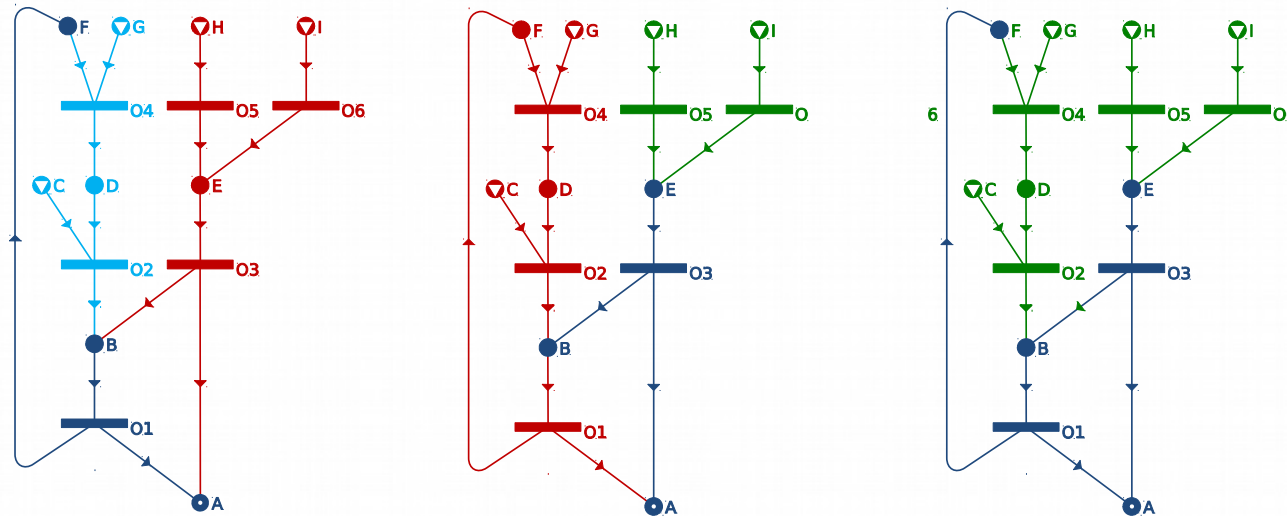
Maximal structure

Product: A

Raw materials: C, G, H, I



Partial Problems Generated on the Basis of the Production of a Material



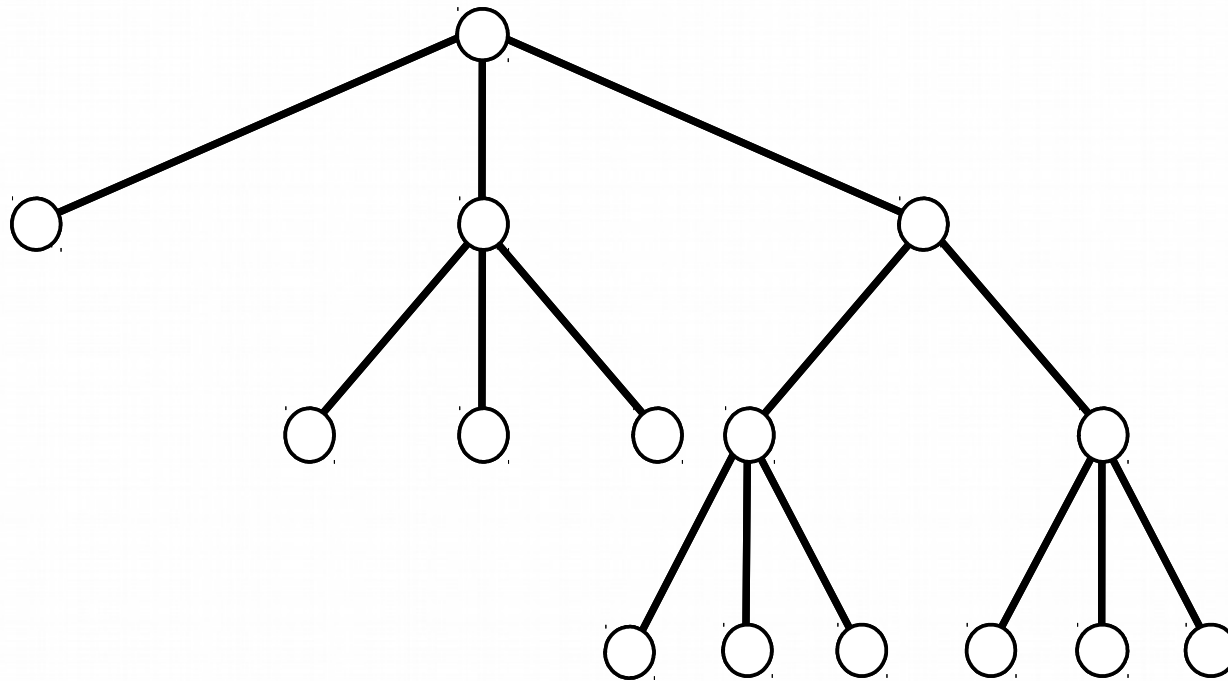
Relation between the operating units and a partial problem

- included in each structure (based on decision)
- included in each structure (based on neutral extension)
- excluded from each structure (based on decision)
- not decided (based on decision)

Enumeration Tree for the Accelerated Branch-and-bound (Worst Case)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

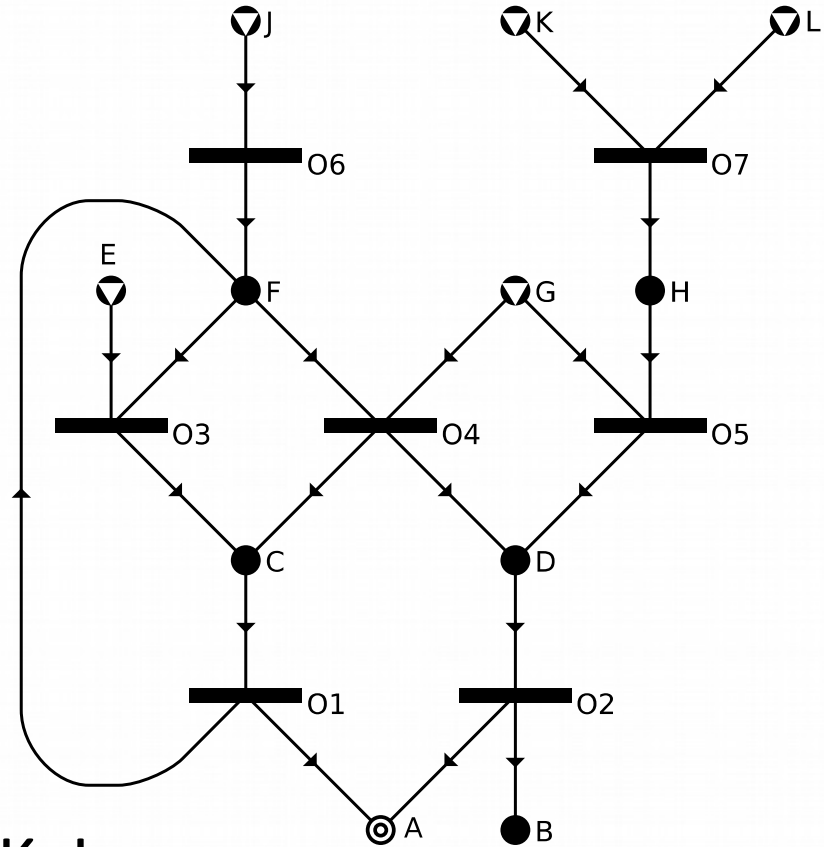


Illustrative Example for Branching by ABB

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Maximal structure



Product: A





Raw materials: E, G, J, K, L

Relation between the operating units and a partial problem

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

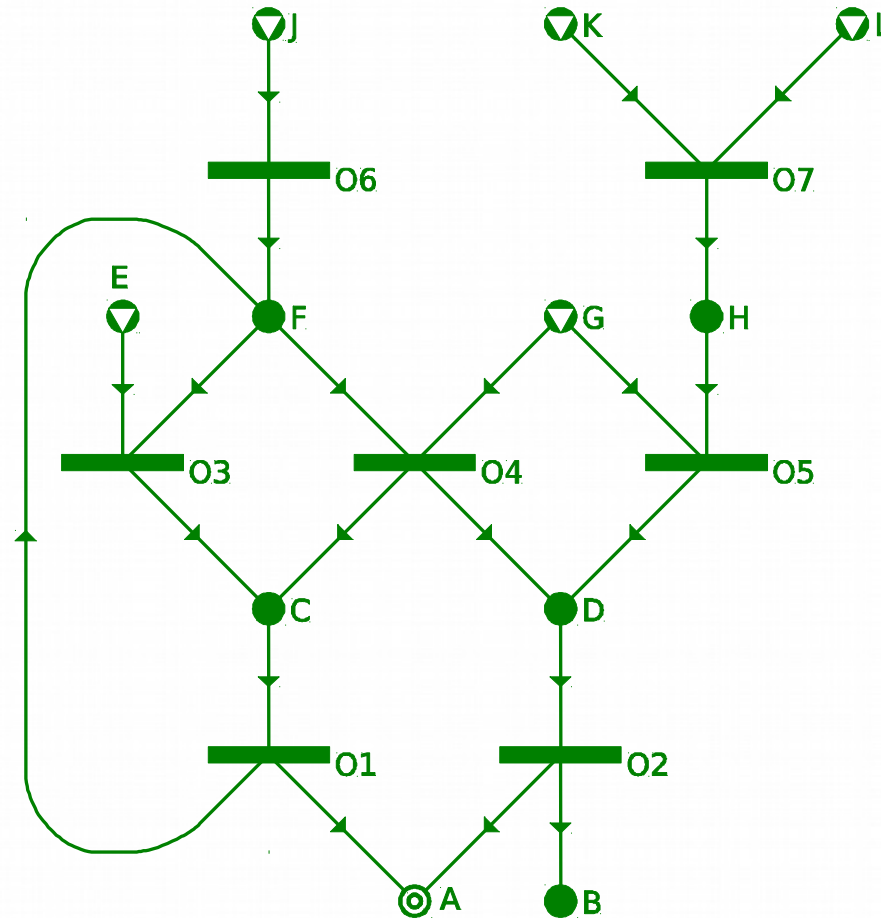
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Relation between the operating units and a partial problem

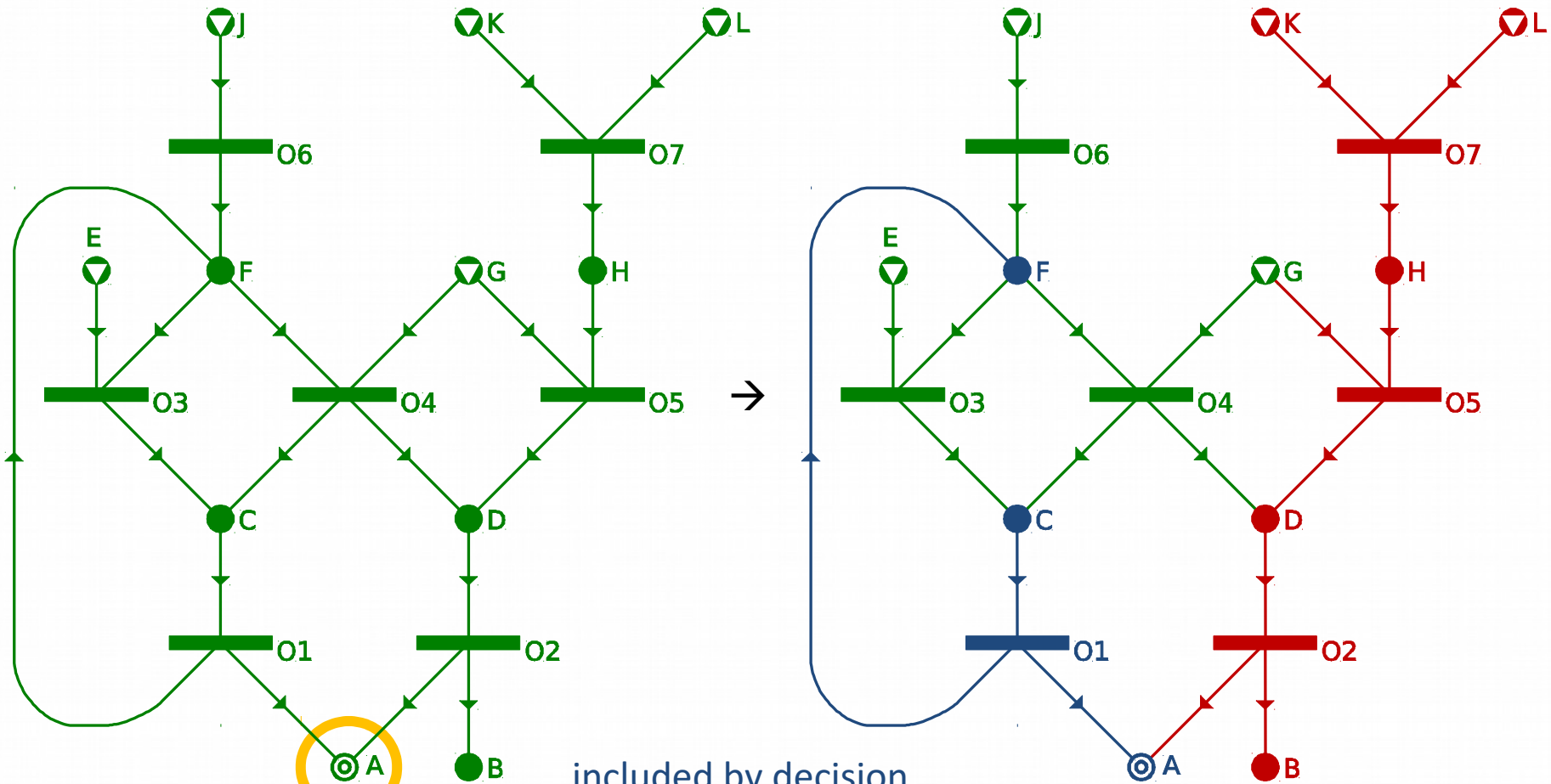
-  included in each structure (based on decision)
-  included in each structure (based on neutral extension)
-  excluded from each structure (based on decision)
-  not decided (based on decision)

Partial problem #1

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Partial problem #1 → #2



included by decision

included by neutral extension

excluded by decision

undecided



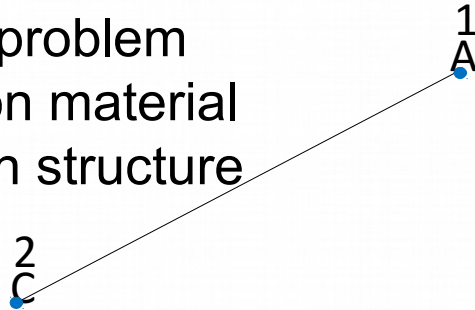
BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Enumeration Tree (Worst Case)

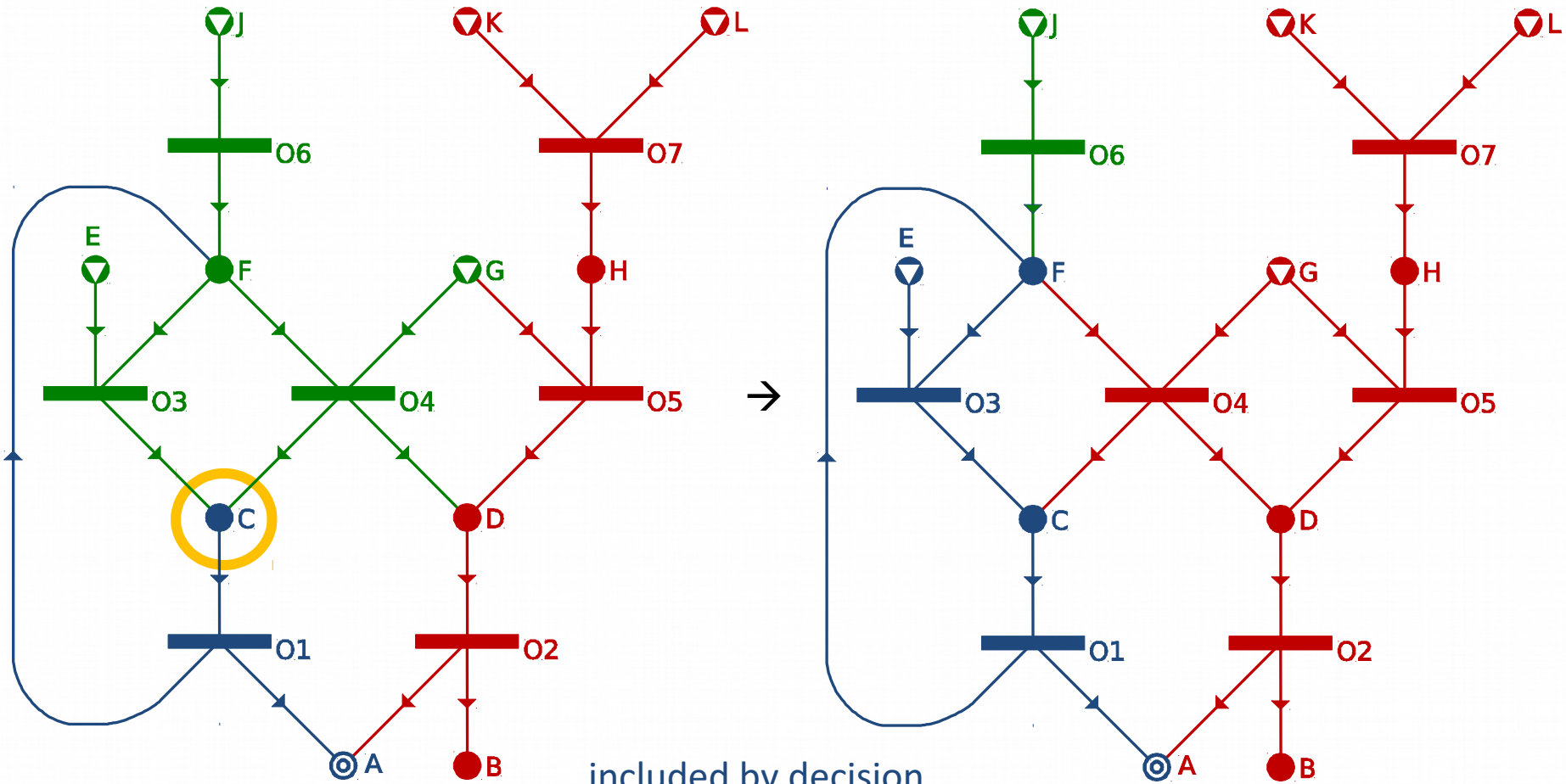
Number: Partial problem

Letter: Decision material

S: Solution structure



Partial problem #2 → #3



included by decision

included by neutral extension

excluded by decision

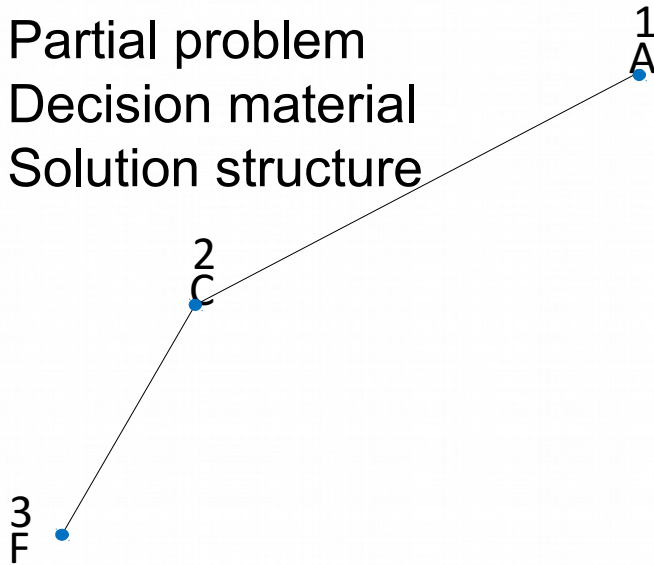
undecided

Enumeration Tree (Worst Case)

Number: Partial problem

Letter: Decision material

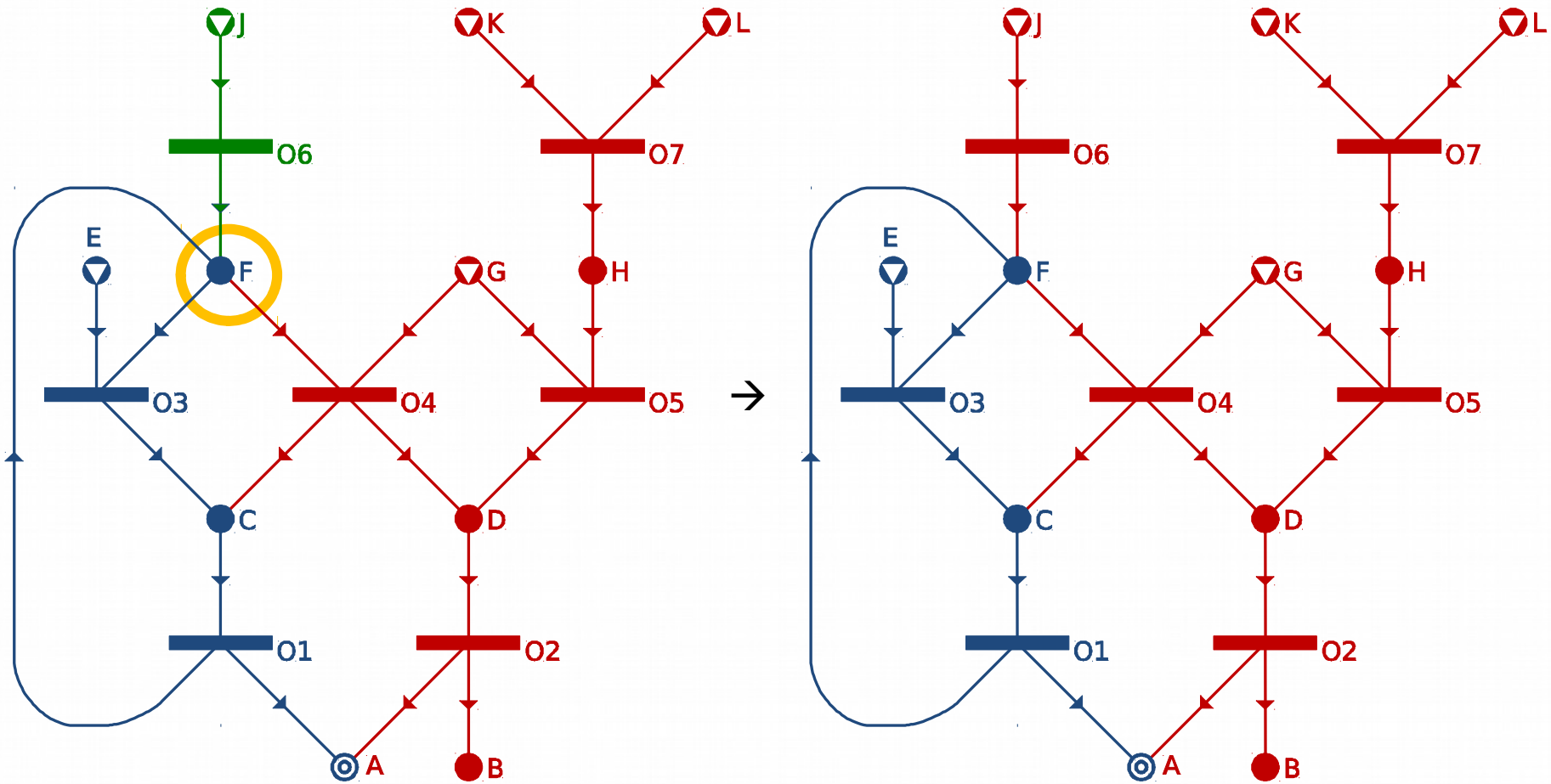
S: Solution structure



Partial problem #3 → #4 (Structure S1)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

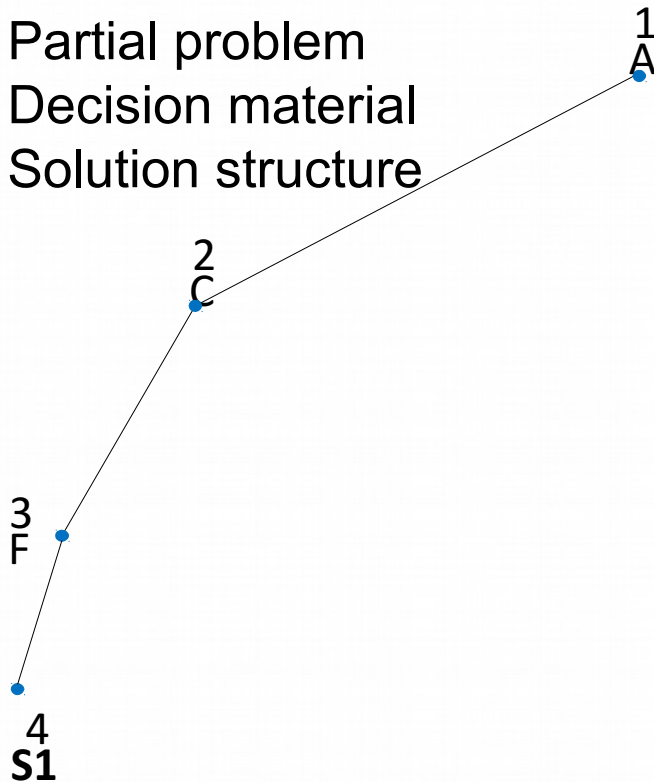


Enumeration Tree (Worst Case)

Number: Partial problem

Letter: Decision material

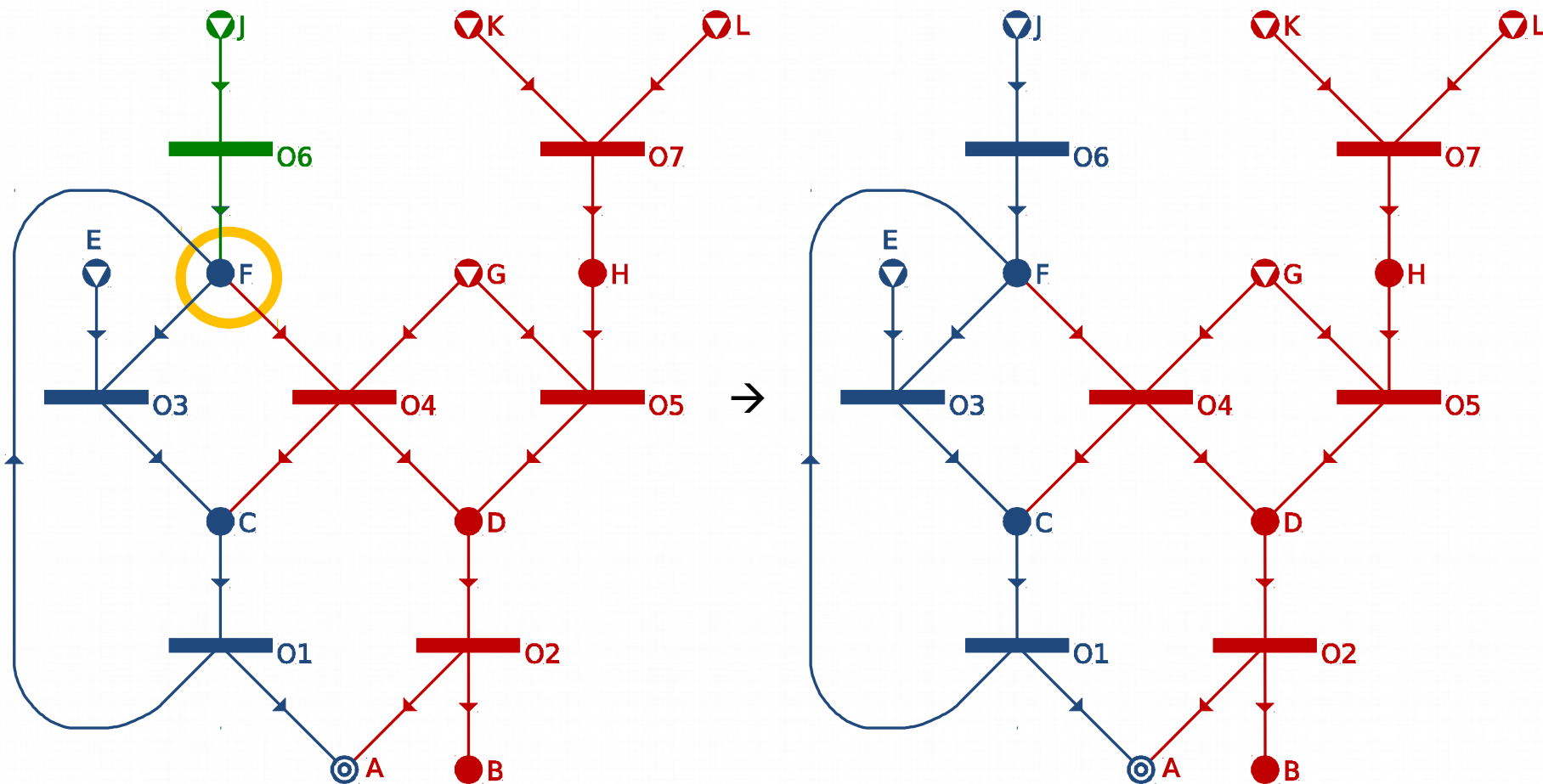
S: Solution structure



Partial problem #3 → #5 (Structure S2)

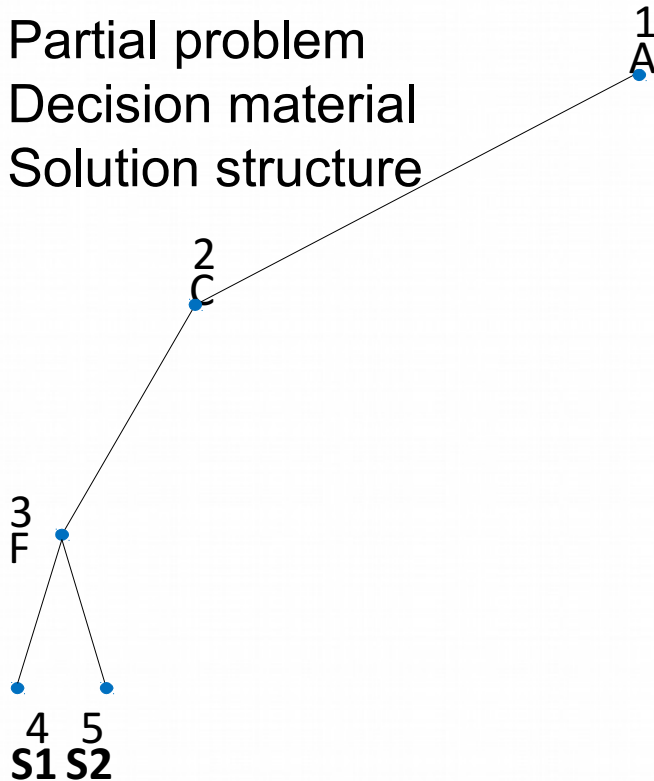
EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

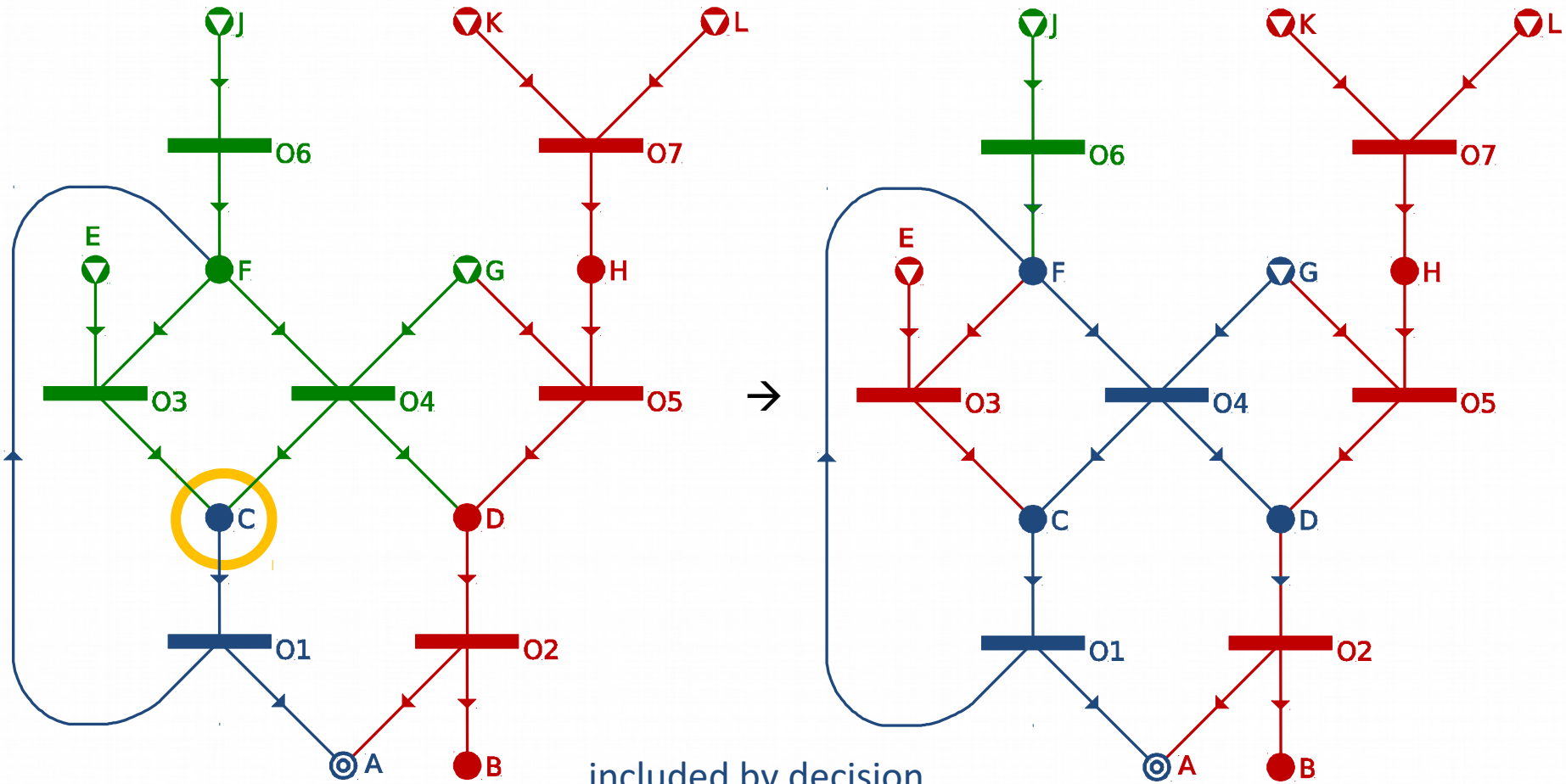


Enumeration Tree (Worst Case)

Number: Partial problem
 Letter: Decision material
 S: Solution structure



Partial problem #2 → #6



included by decision

included by neutral extension

excluded by decision

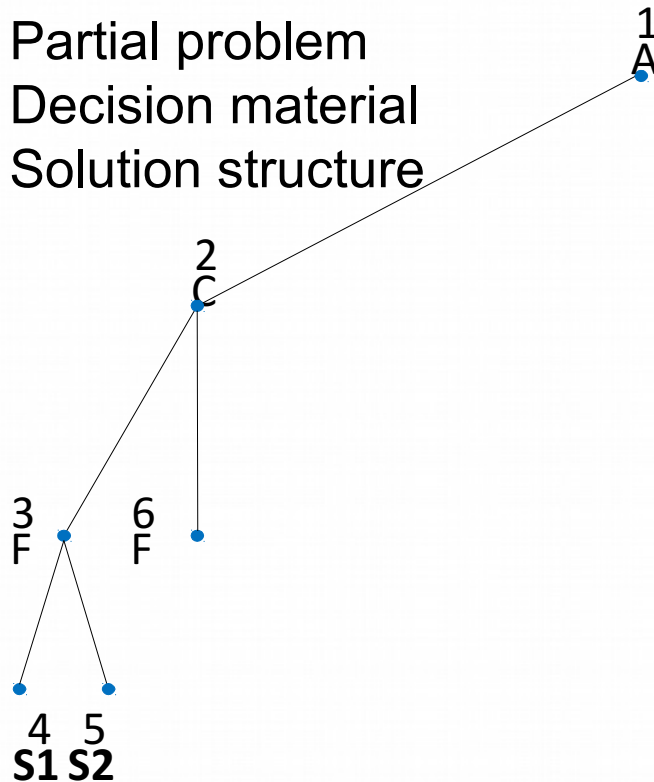
undecided

Enumeration Tree (Worst Case)

Number: Partial problem

Letter: Decision material

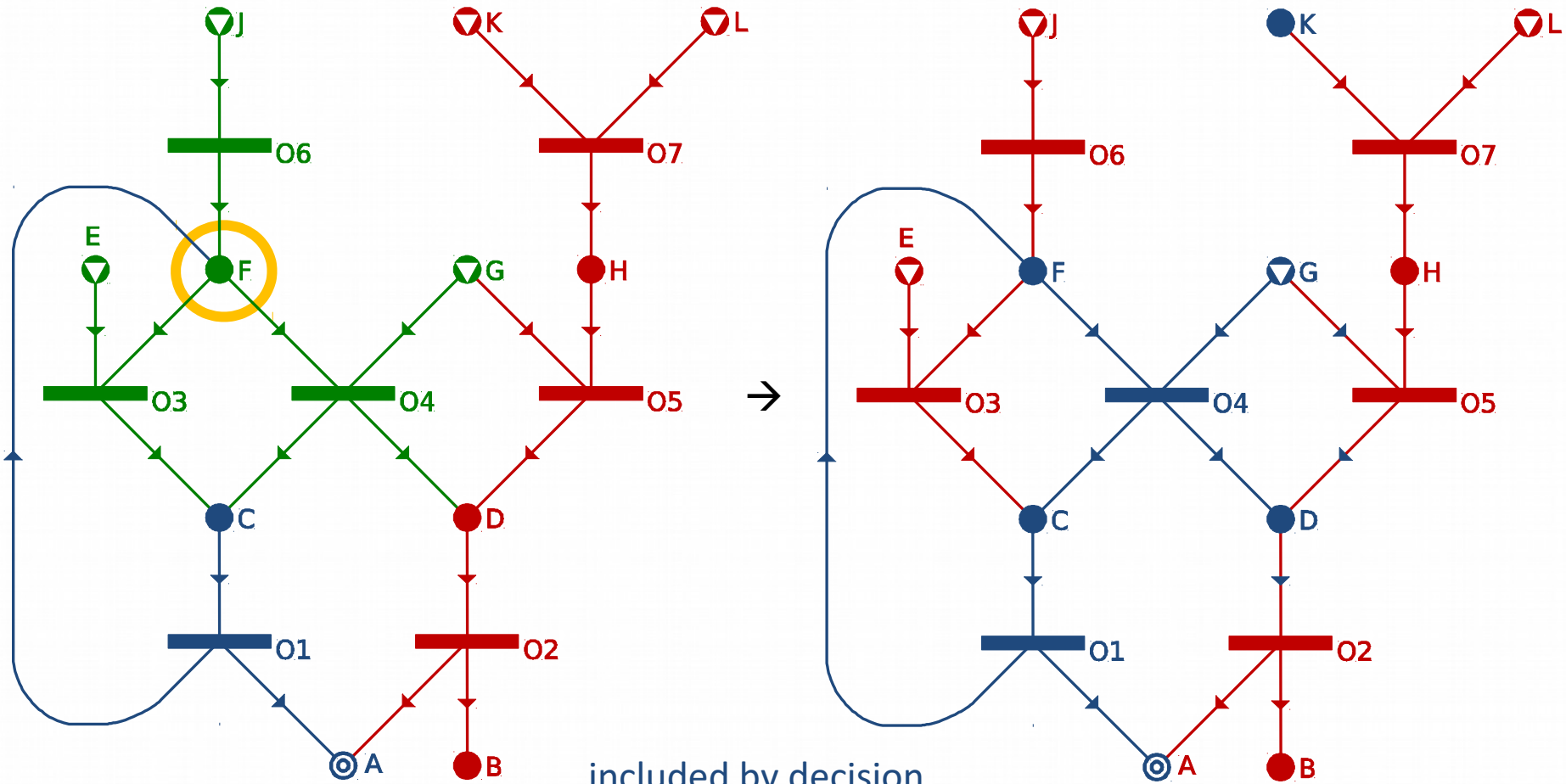
S: Solution structure



Partial problem #6 → #7 (Structure S3)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



included by decision

included by neutral extension

excluded by decision

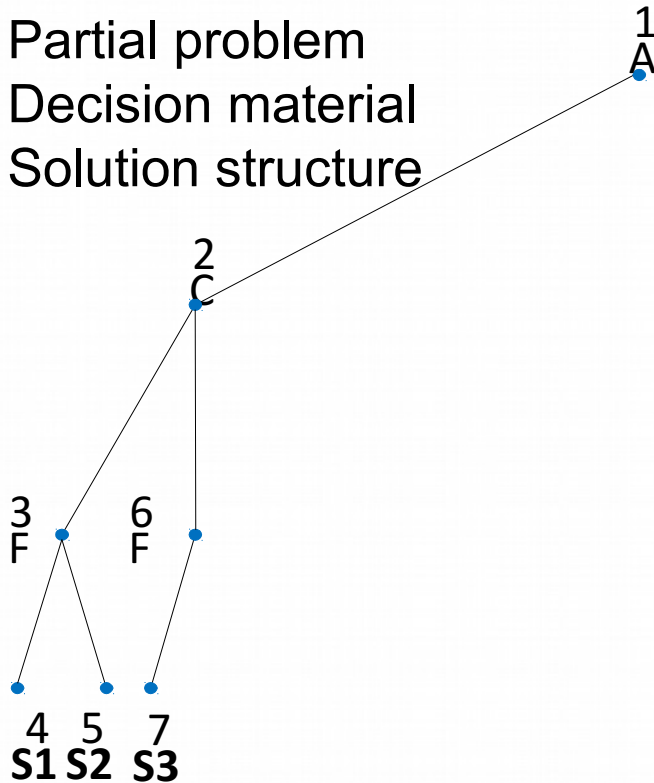
undecided



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Enumeration Tree (Worst Case)

Number: Partial problem
 Letter: Decision material
 S: Solution structure

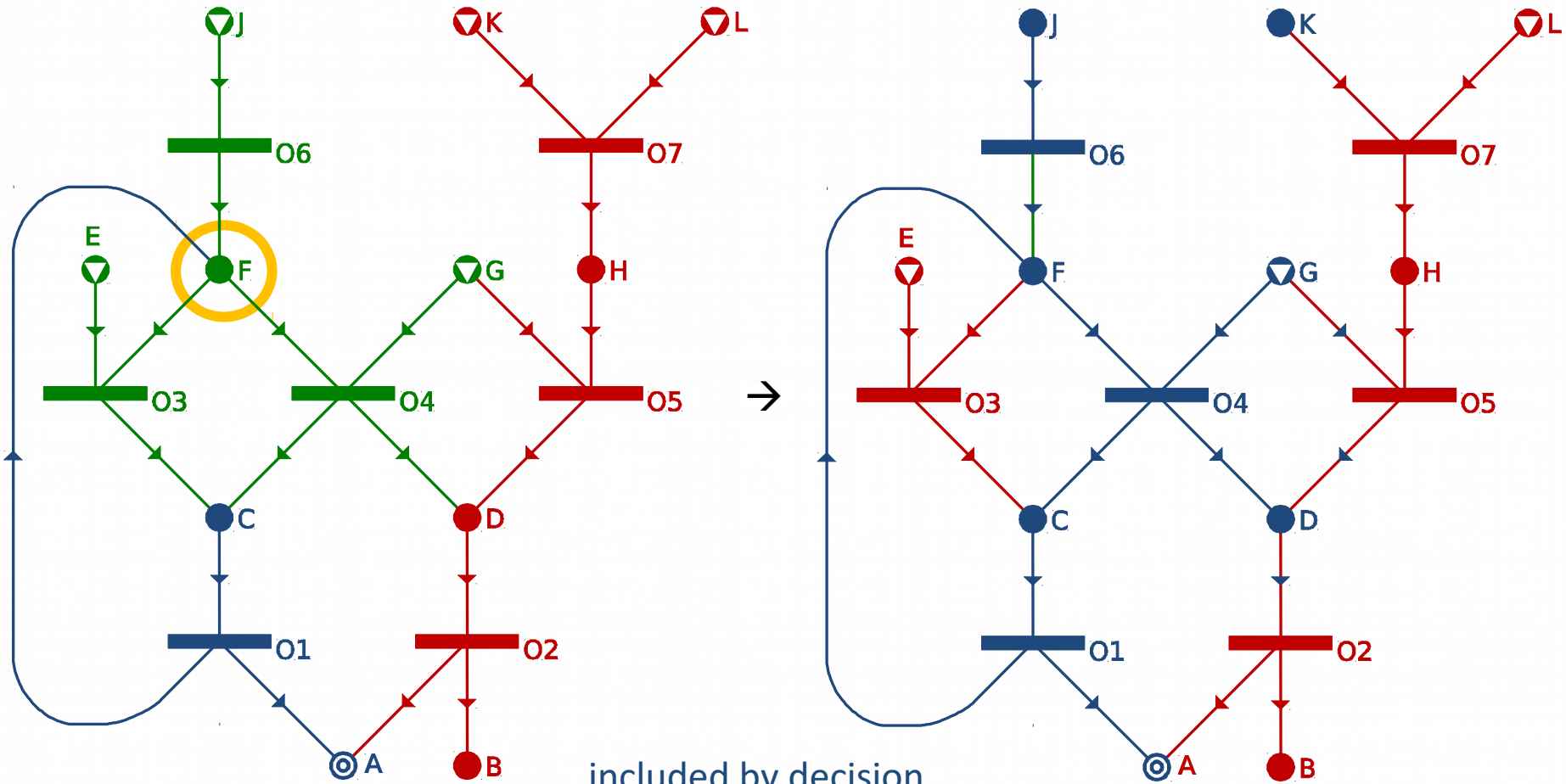


S12 S13 S14 S15 S16 S17 S18 S19

Partial problem #6 → #8 (Structure S4)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



included by decision

included by neutral extension

excluded by decision

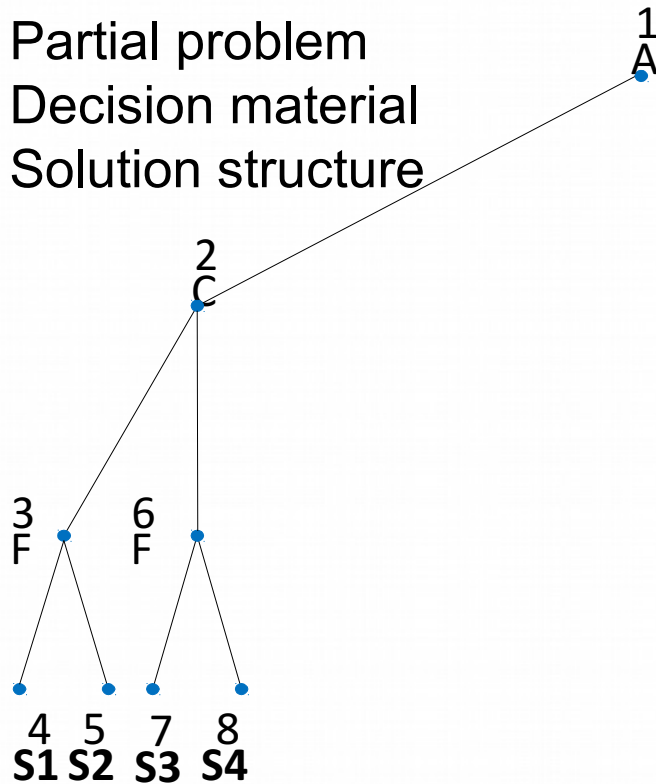
undecided

Enumeration Tree (Worst Case)

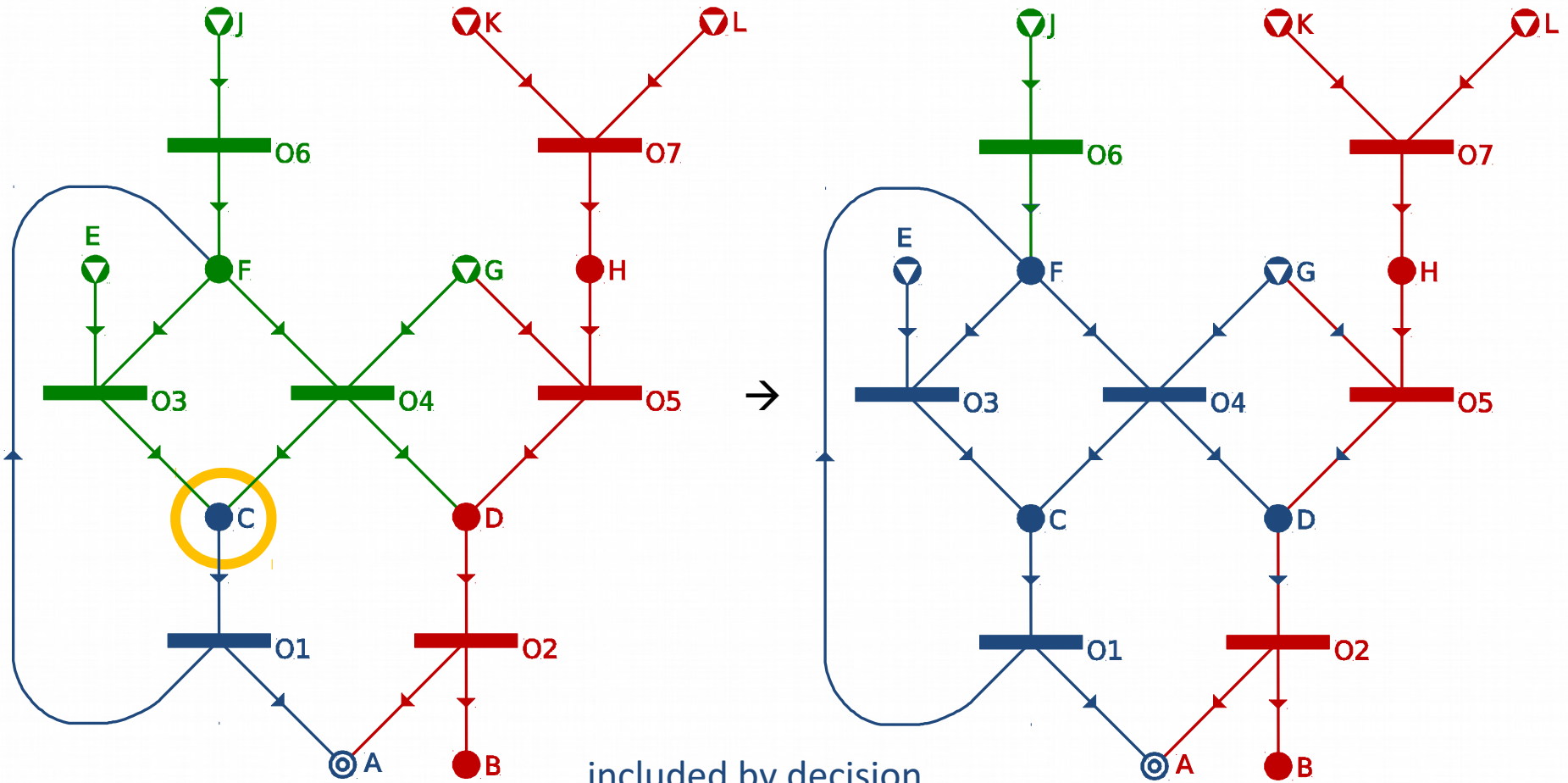
Number: Partial problem

Letter: Decision material

S: Solution structure



Partial problem #2 → #9



included by decision

included by neutral extension

excluded by decision

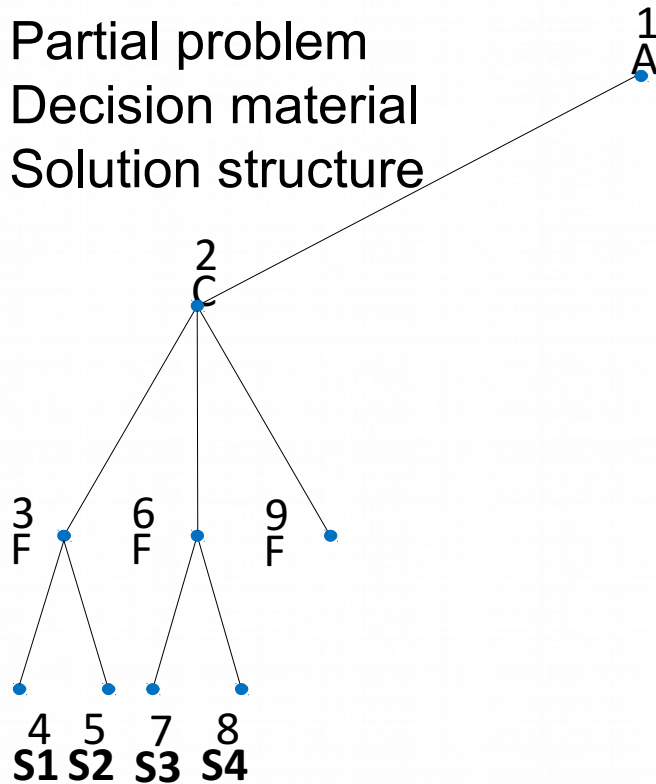
undecided

Enumeration Tree (Worst Case)

Number: Partial problem

Letter: Decision material

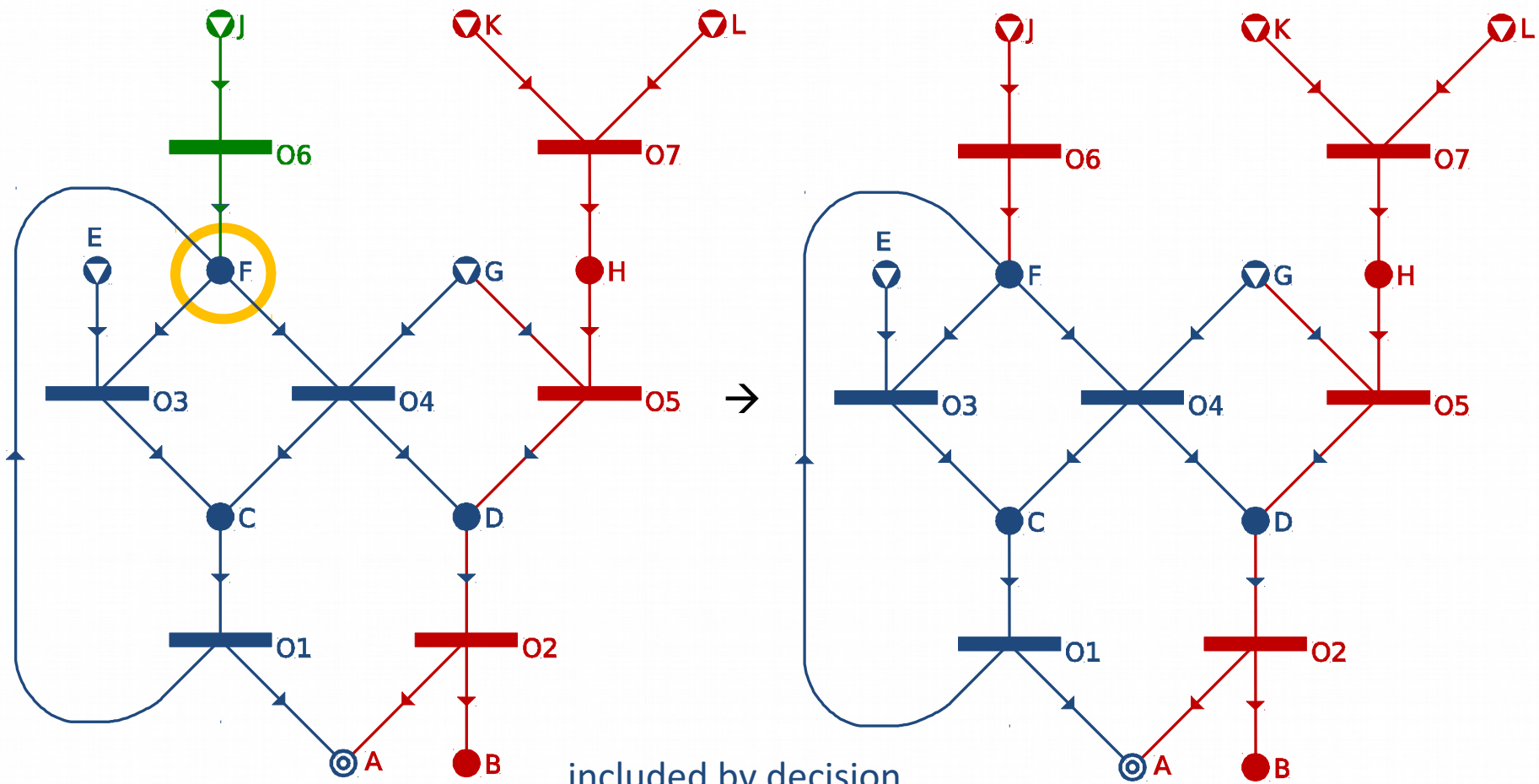
S: Solution structure



Partial problem #9 → #10 (Structure S5)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



included by decision

included by neutral extension

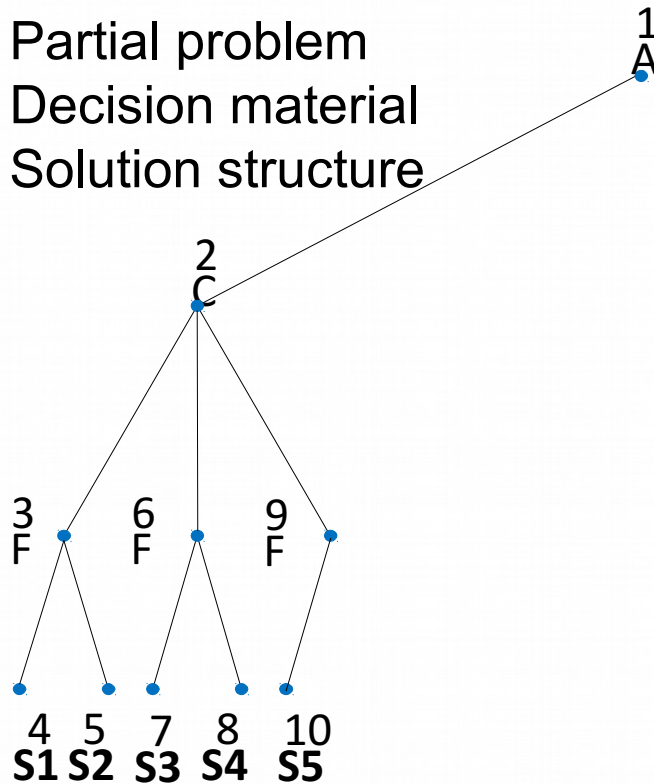
excluded by decision

undecided



Enumeration Tree (Worst Case)

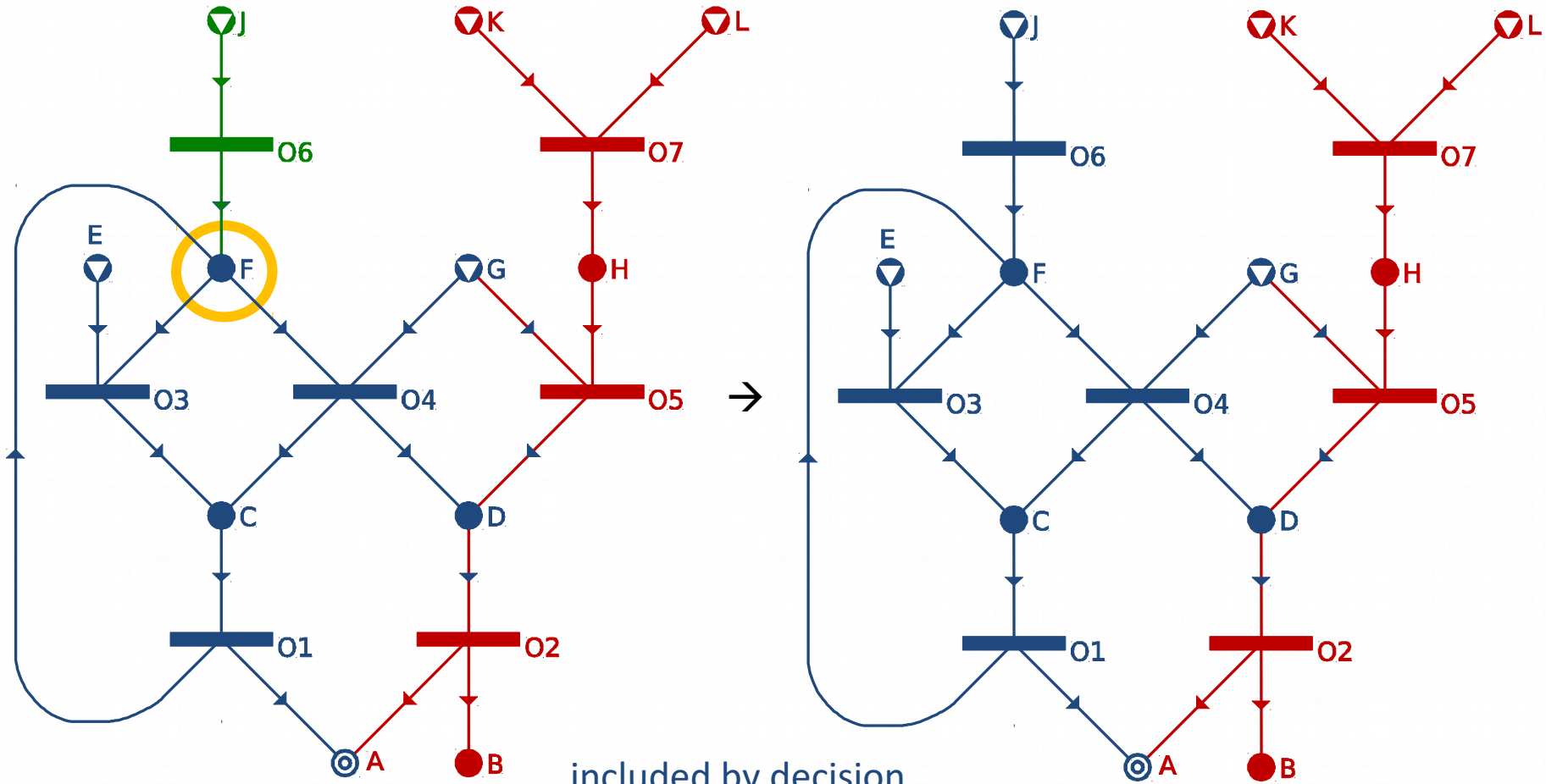
Number: Partial problem
 Letter: Decision material
 S: Solution structure



Partial problem #9 → #11 (Structure S6)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



included by decision

included by neutral extension

excluded by decision

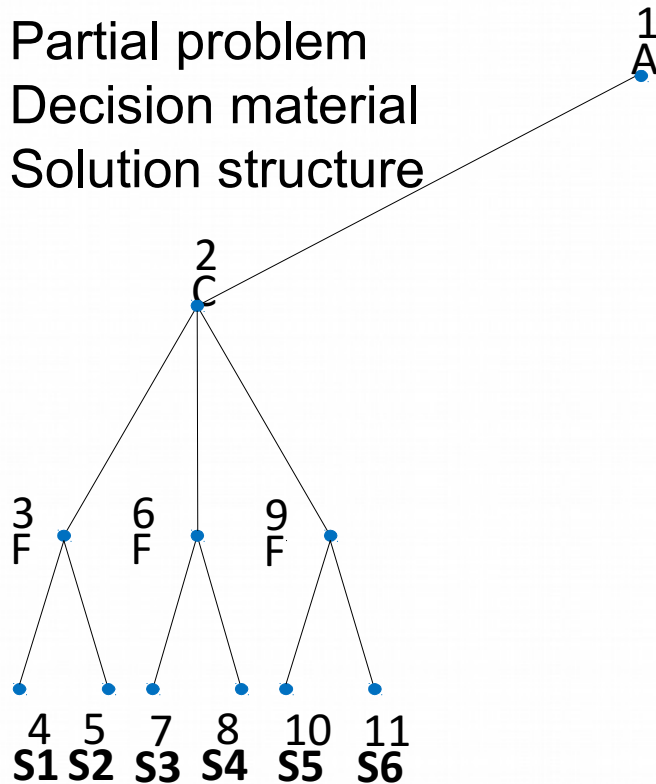
undecided



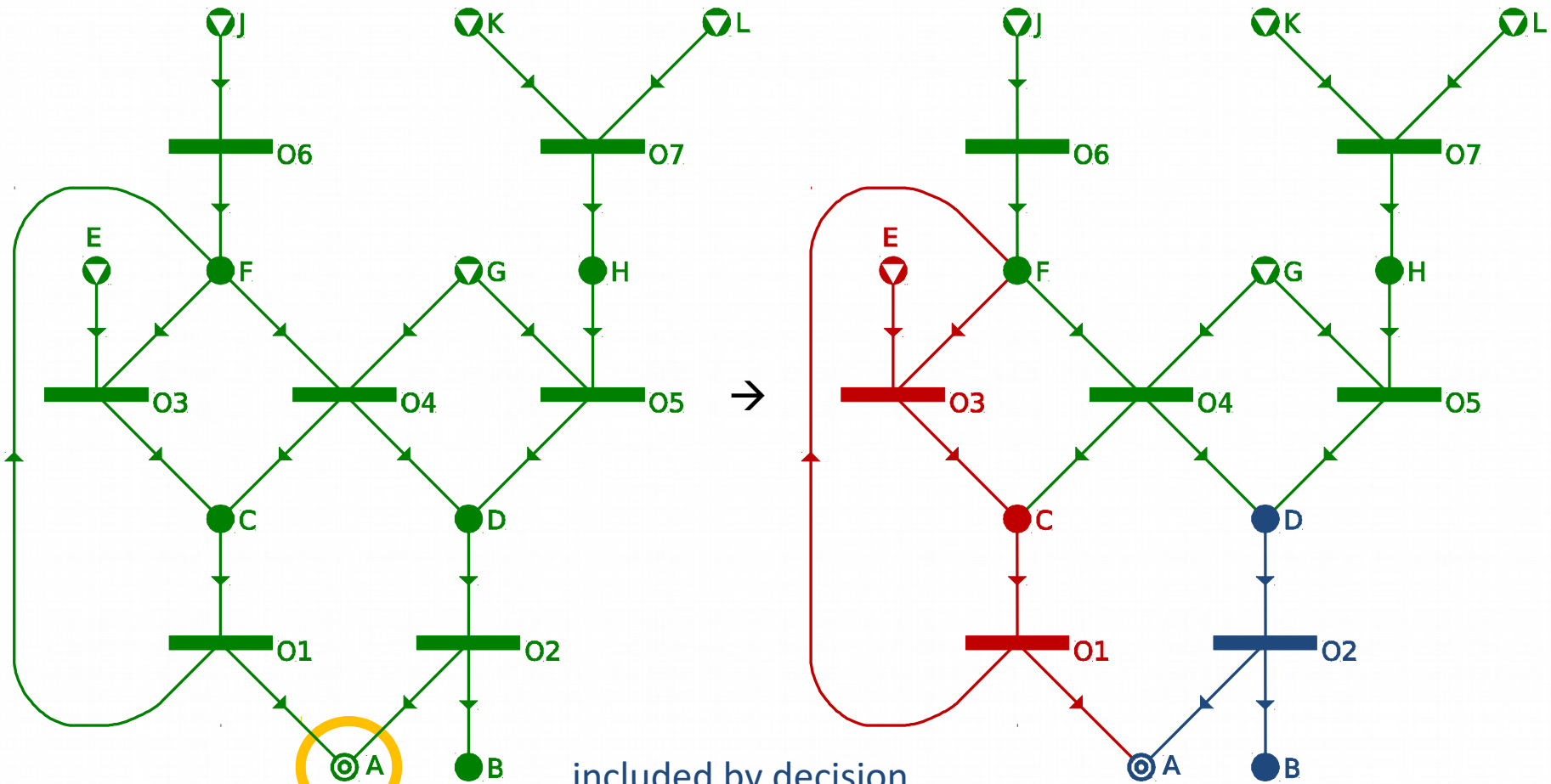
BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Enumeration Tree (Worst Case)

Number: Partial problem
 Letter: Decision material
 S: Solution structure



Partial problem #1 → #12



included by decision

included by neutral extension

excluded by decision

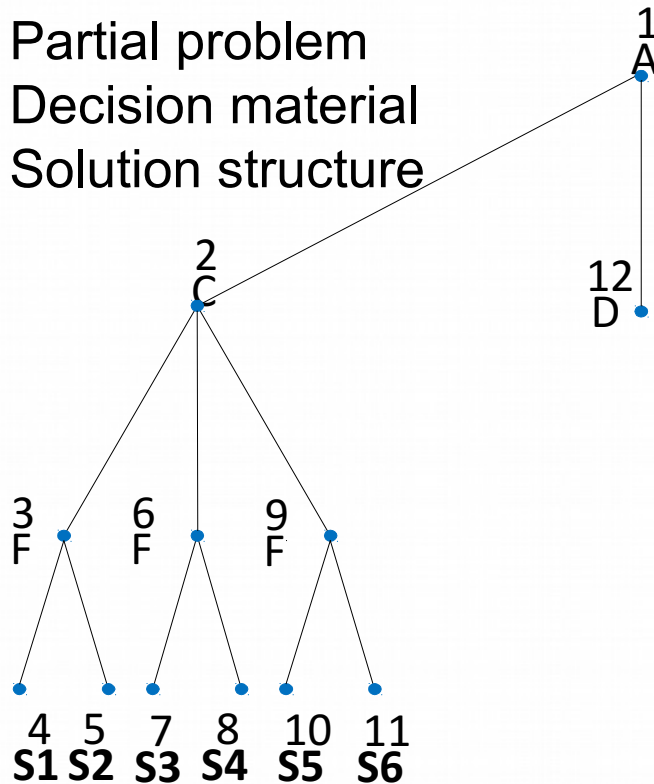
undecided



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Enumeration Tree (Worst Case)

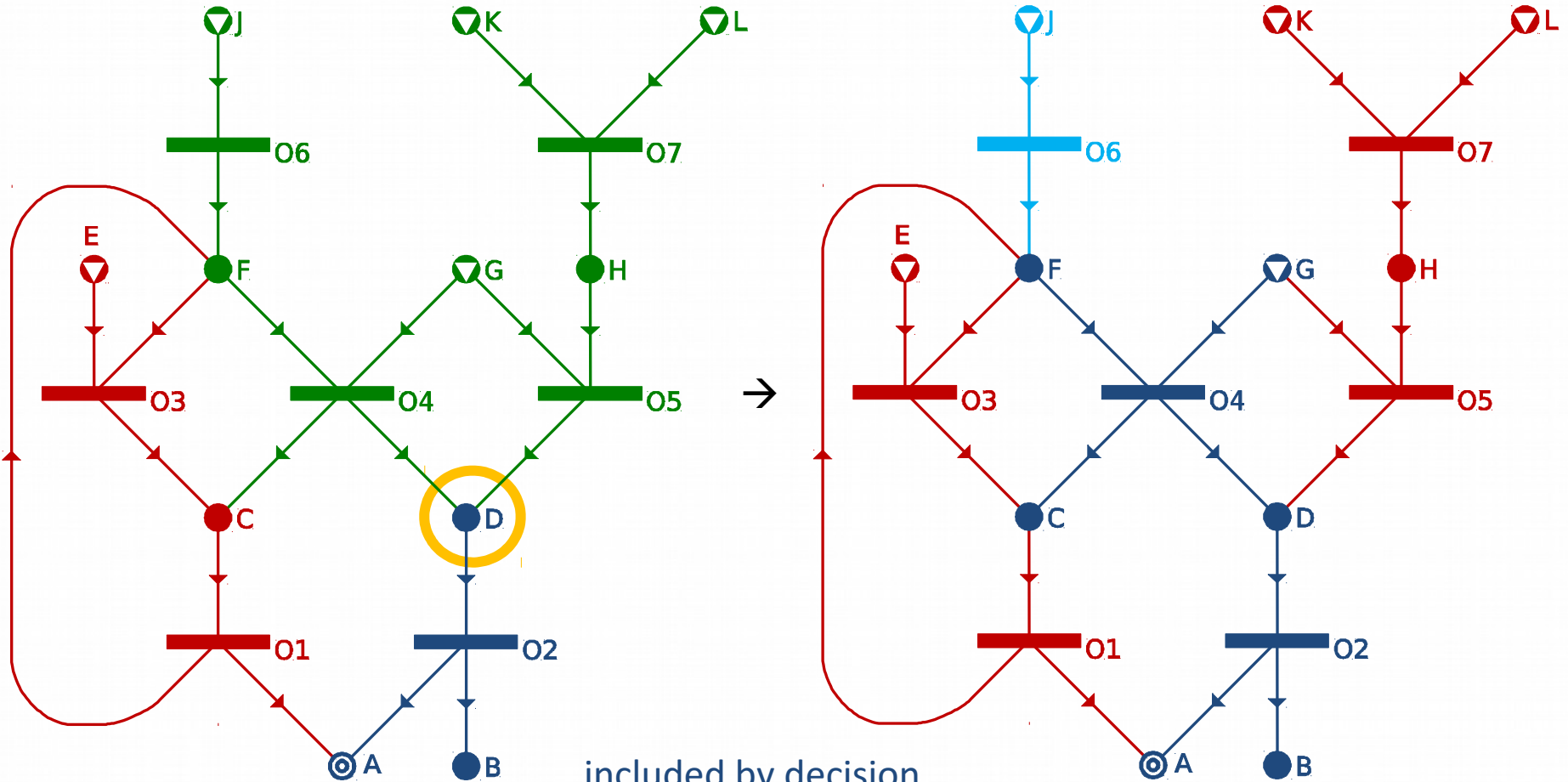
Number: Partial problem
 Letter: Decision material
 S: Solution structure



Partial problem #12 → #13 (Structure S7)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



included by decision

included by neutral extension

excluded by decision

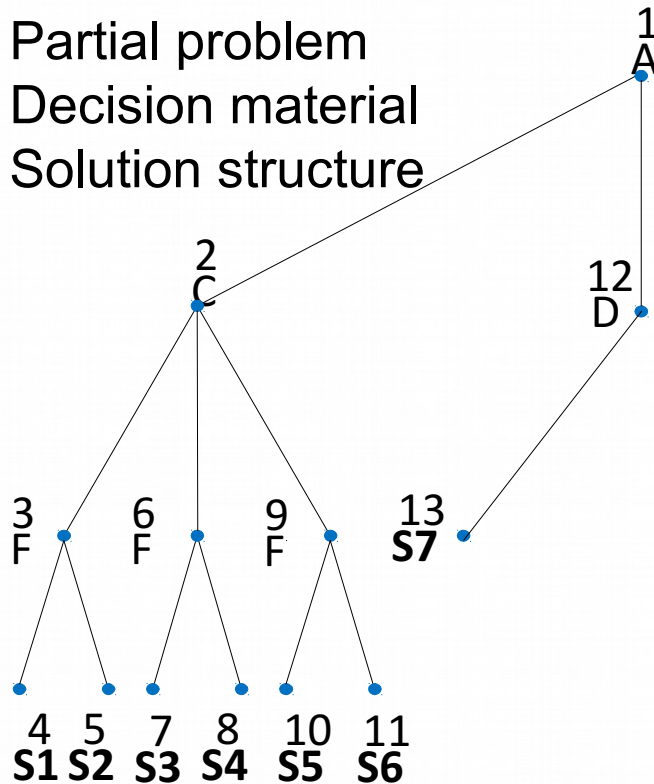
undecided



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Enumeration Tree (Worst Case)

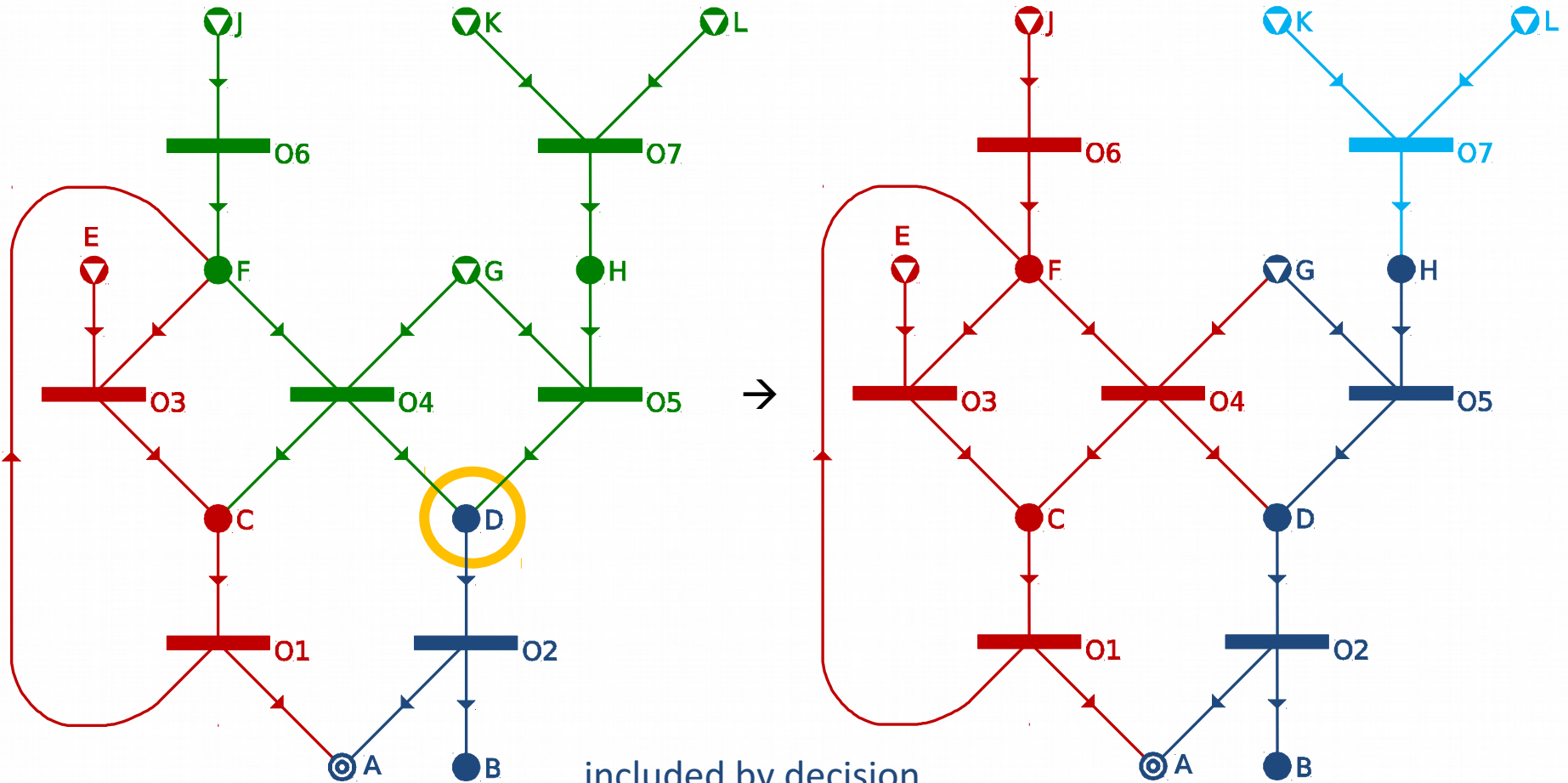
Number: Partial problem
 Letter: Decision material
 S: Solution structure



Partial problem #12 → #14 (Structure S8)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



included by decision

included by neutral extension

excluded by decision

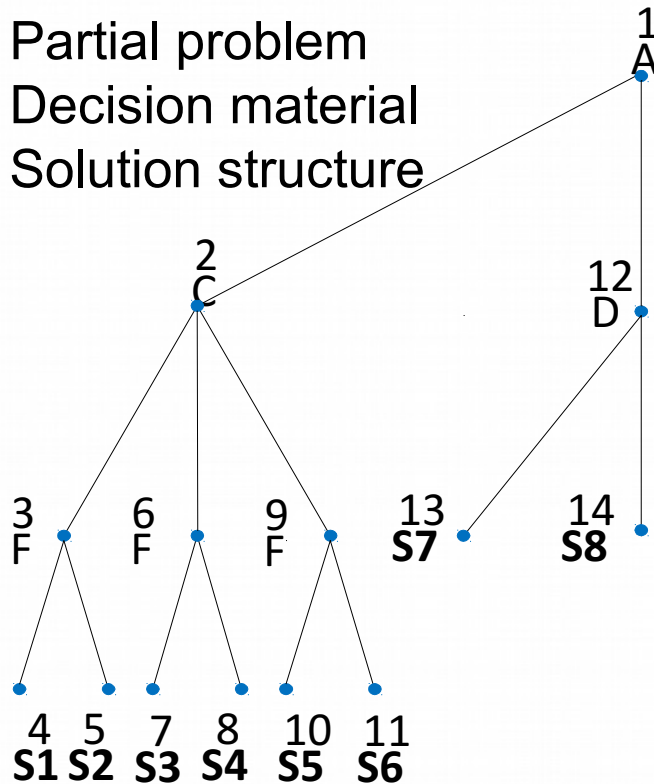
undecided



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Enumeration Tree (Worst Case)

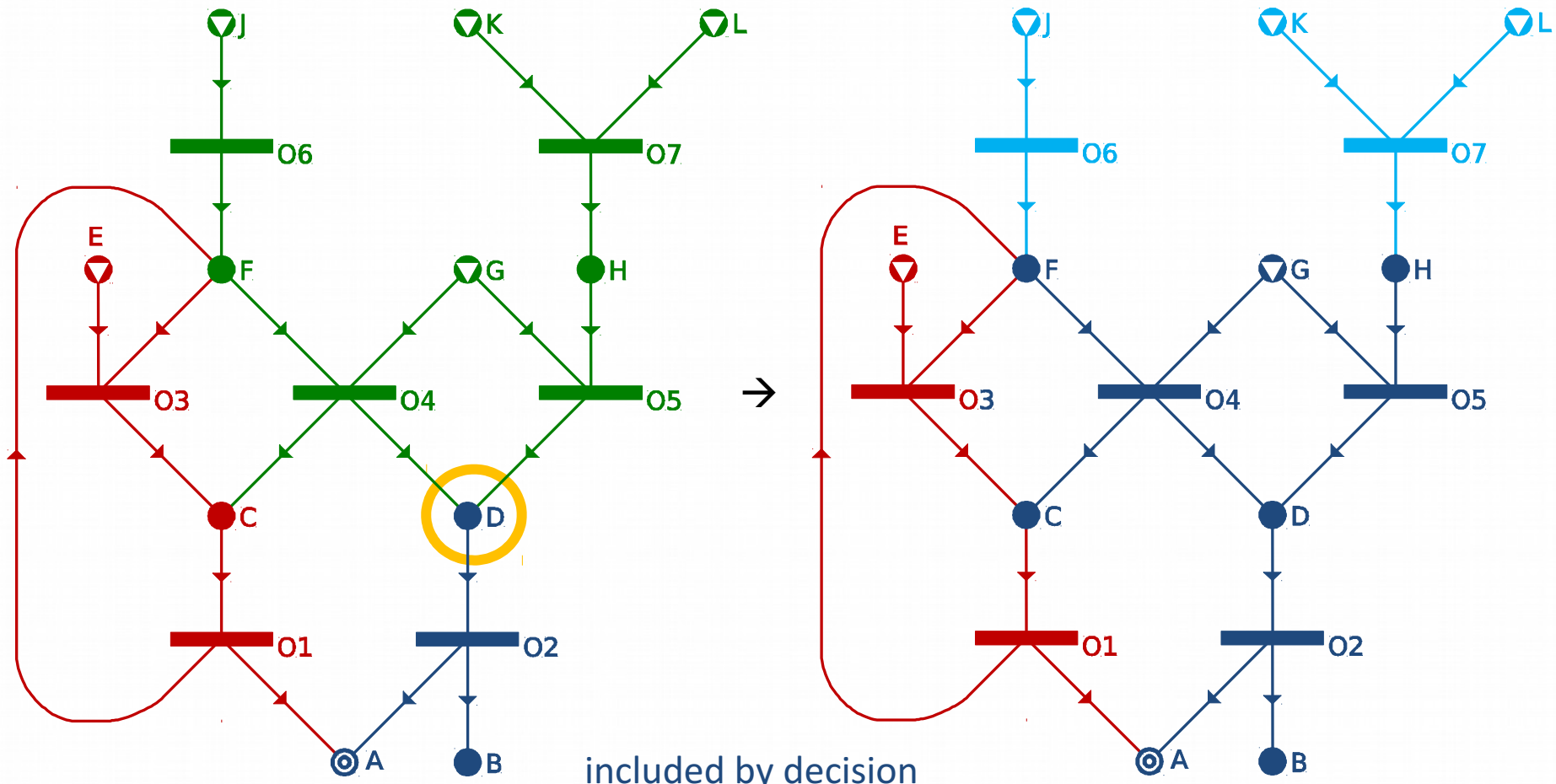
Number: Partial problem
 Letter: Decision material
 S: Solution structure



Partial problem #12 → #15 (Structure S9)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



included by decision

included by neutral extension

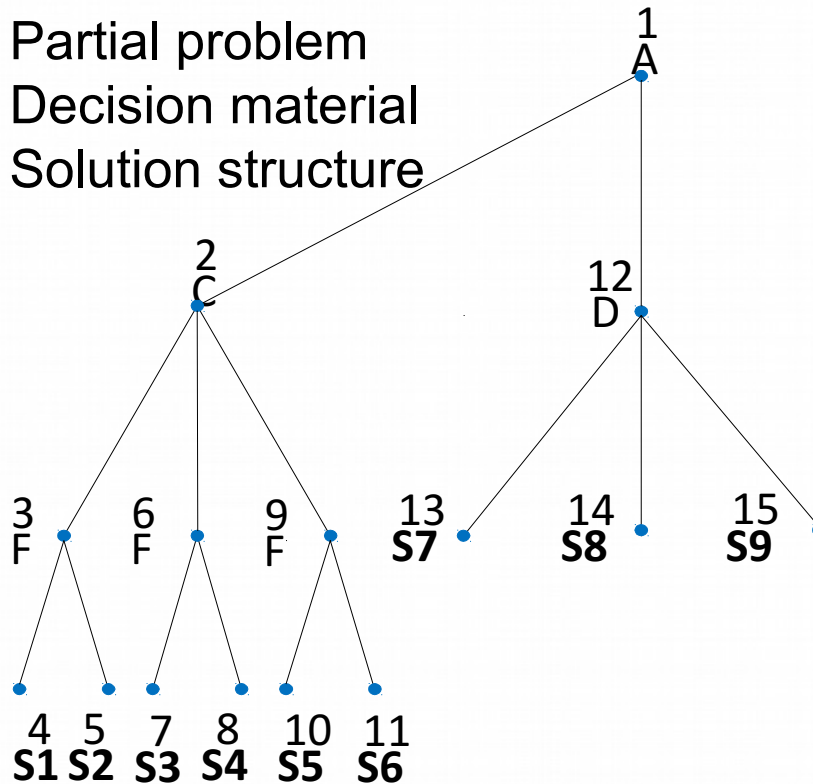
excluded by decision

undecided

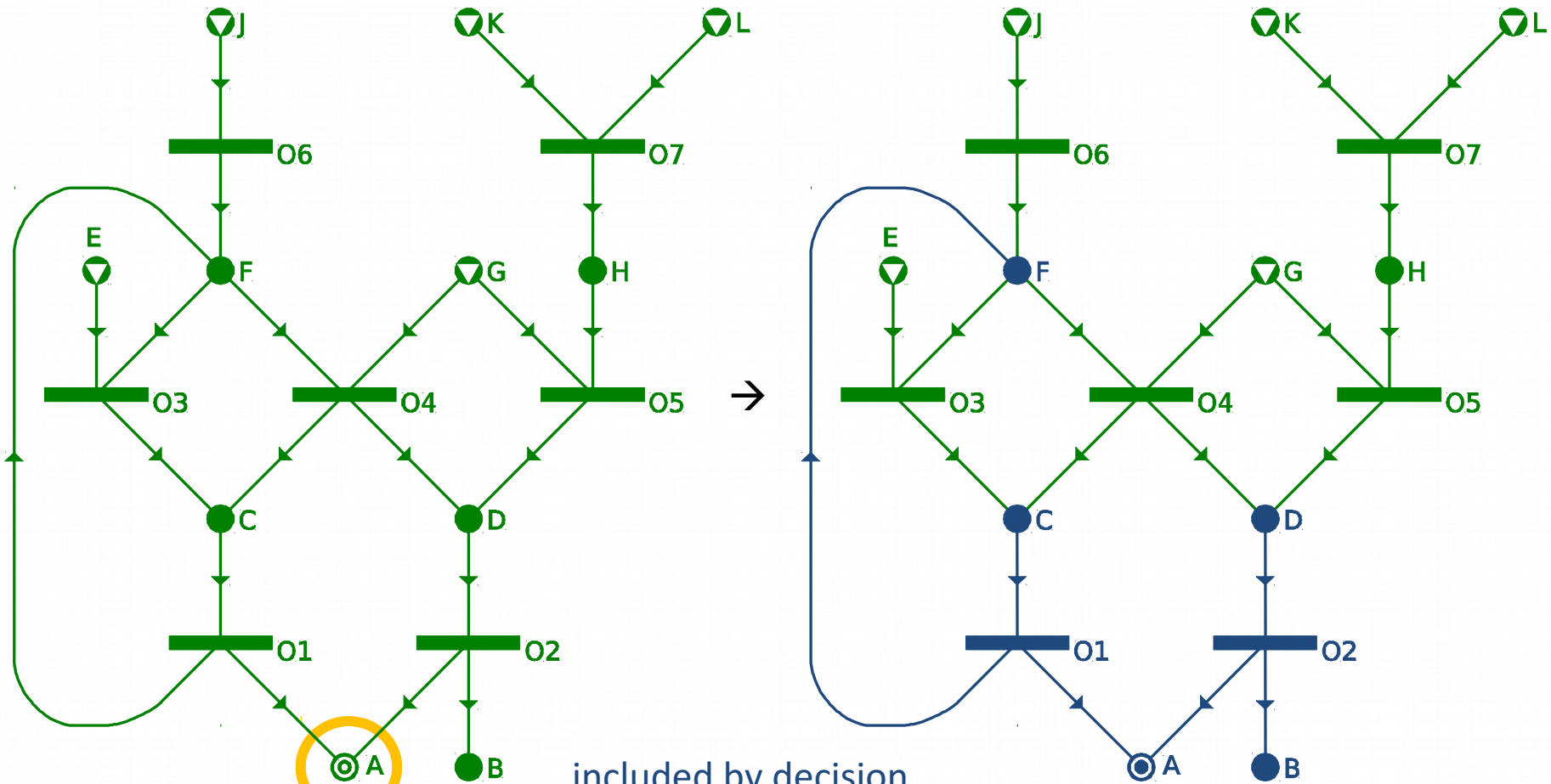


Enumeration Tree (Worst Case)

Number: Partial problem
 Letter: Decision material
 S: Solution structure



Partial problem #1 → #16



included by decision

included by neutral extension

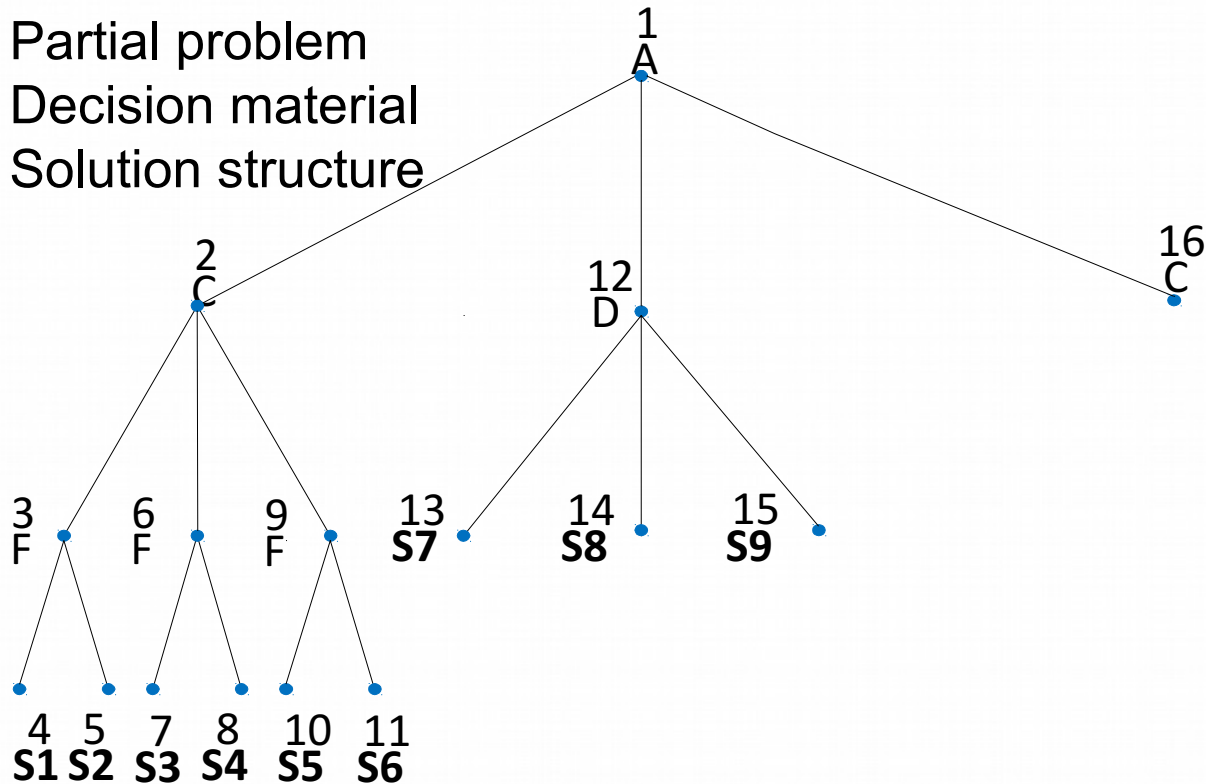
excluded by decision

undecided

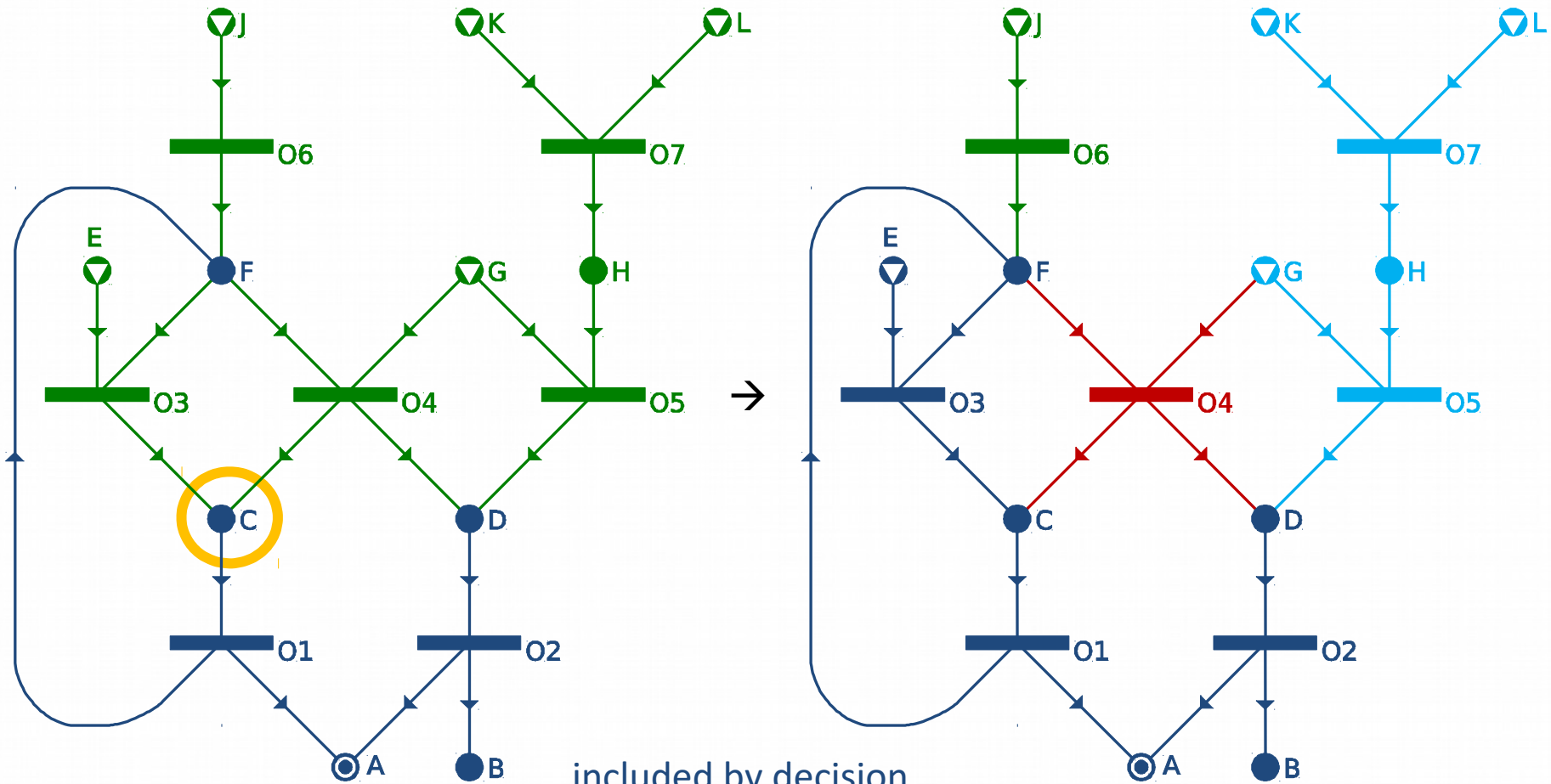


Enumeration Tree (Worst Case)

Number: Partial problem
 Letter: Decision material
 S: Solution structure



Partial problem #16 → #17



included by decision

included by neutral extension

excluded by decision

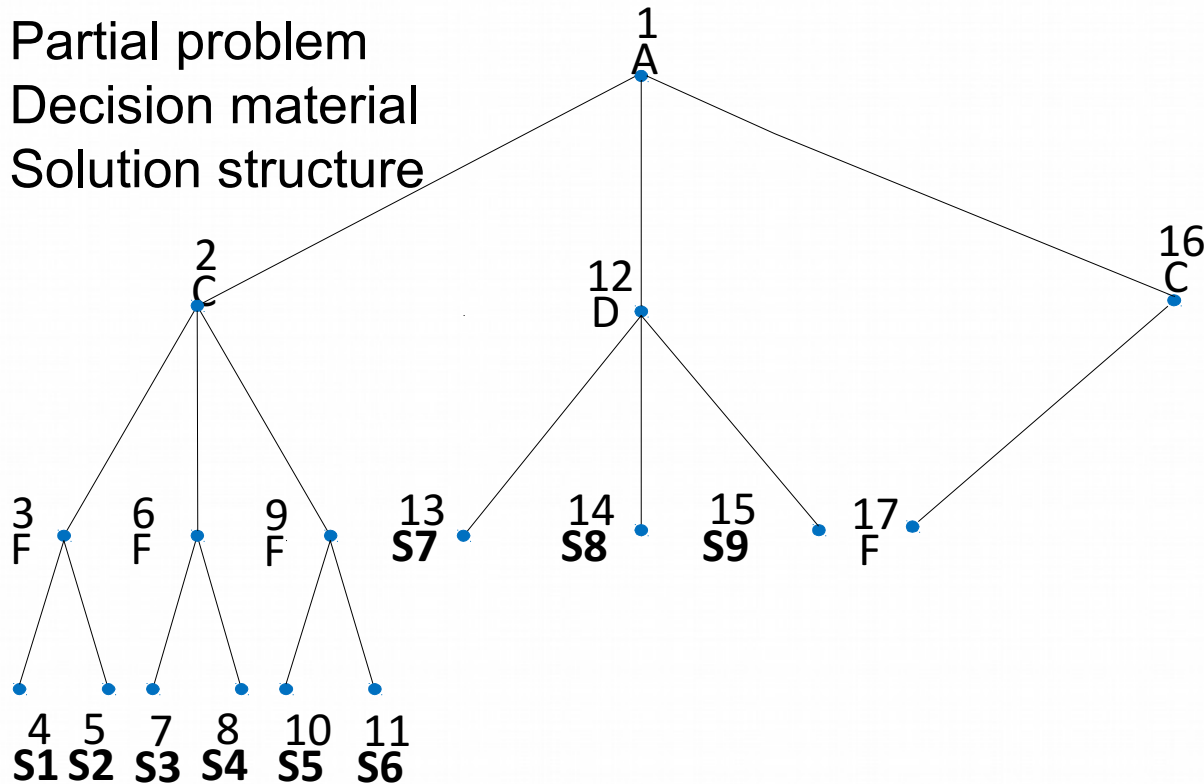
undecided



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Enumeration Tree (Worst Case)

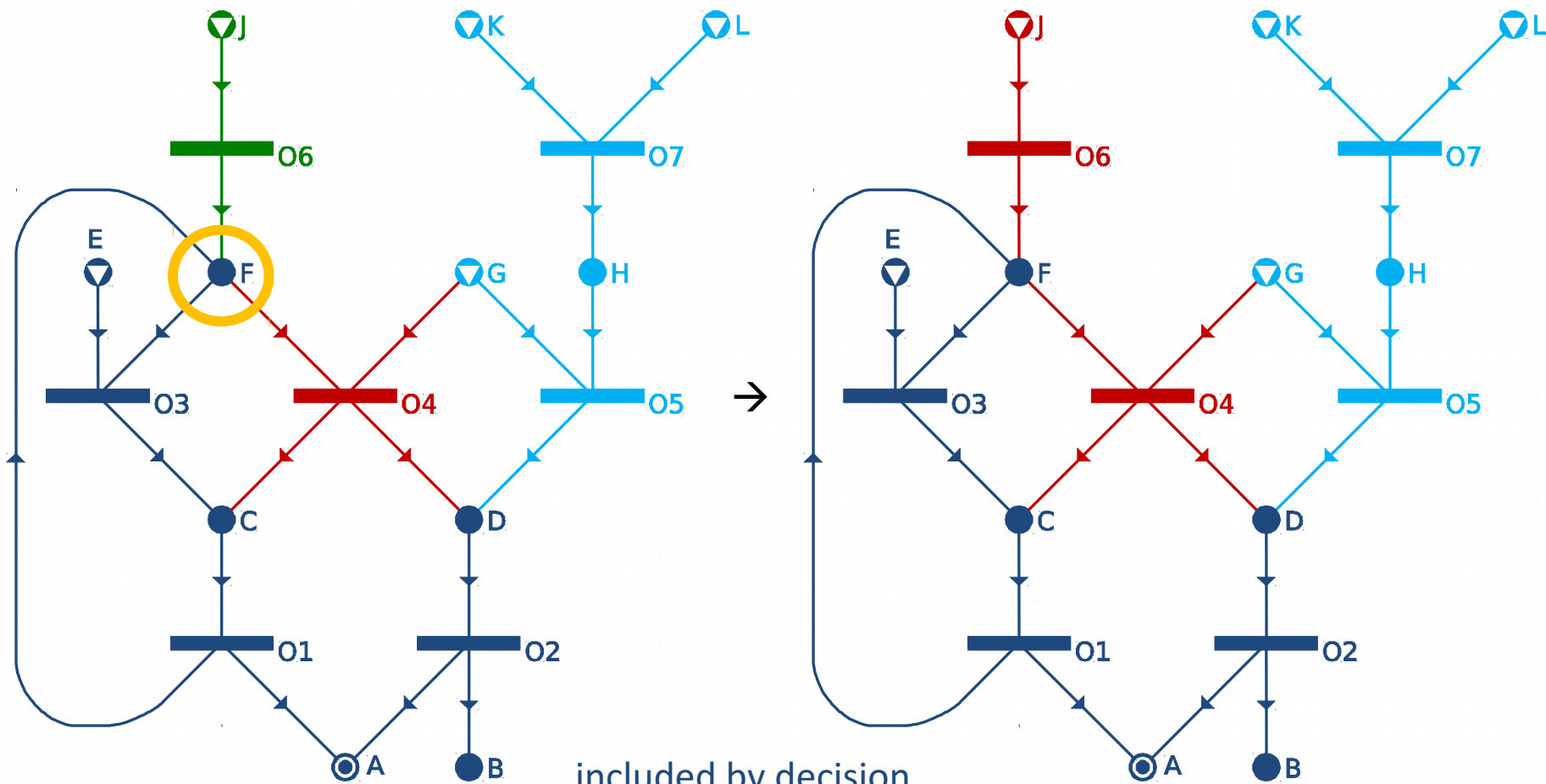
Number: Partial problem
 Letter: Decision material
 S: Solution structure



Partial problem #17 → #18 (Structure S10)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



included by decision

included by neutral extension

excluded by decision

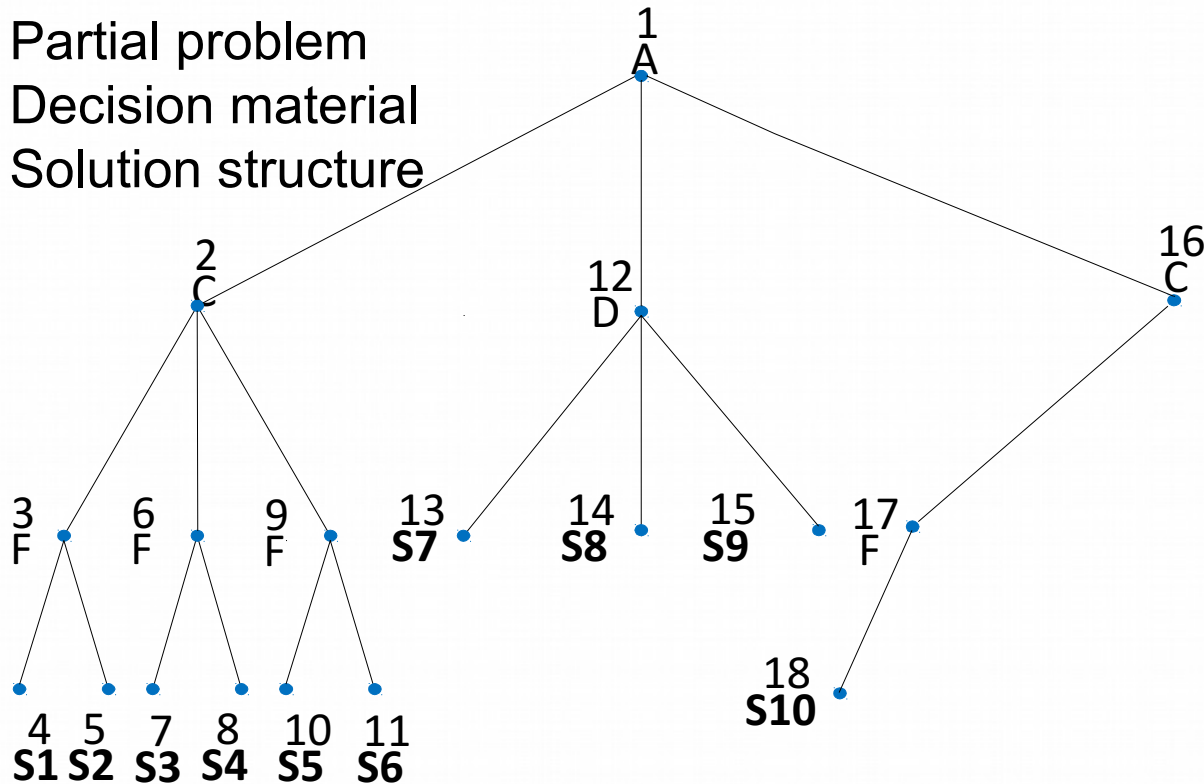
undecided



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Enumeration Tree (Worst Case)

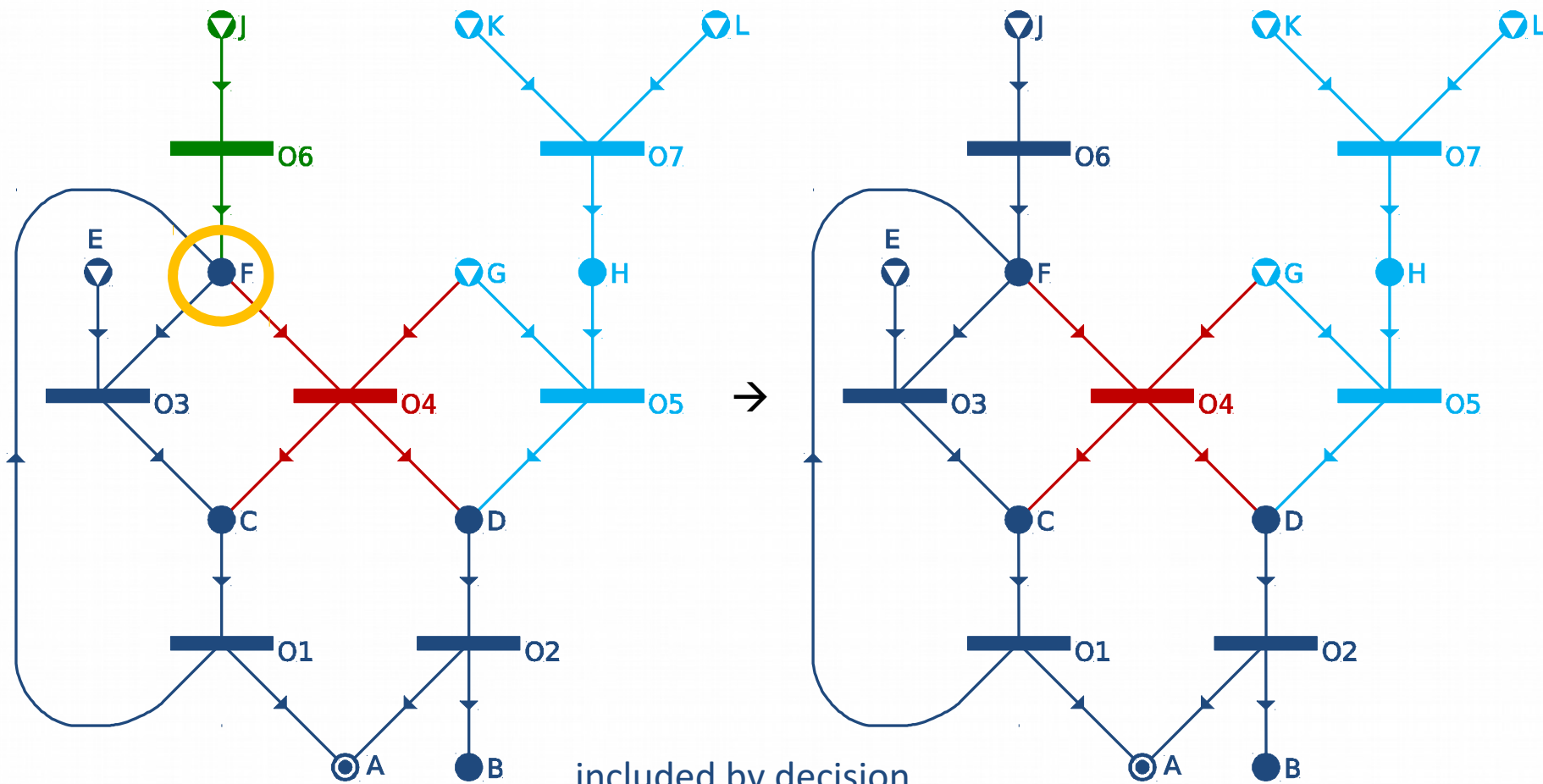
Number: Partial problem
 Letter: Decision material
 S: Solution structure



Partial problem #17 → #19 (Structure S10)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



included by decision

included by neutral extension

excluded by decision

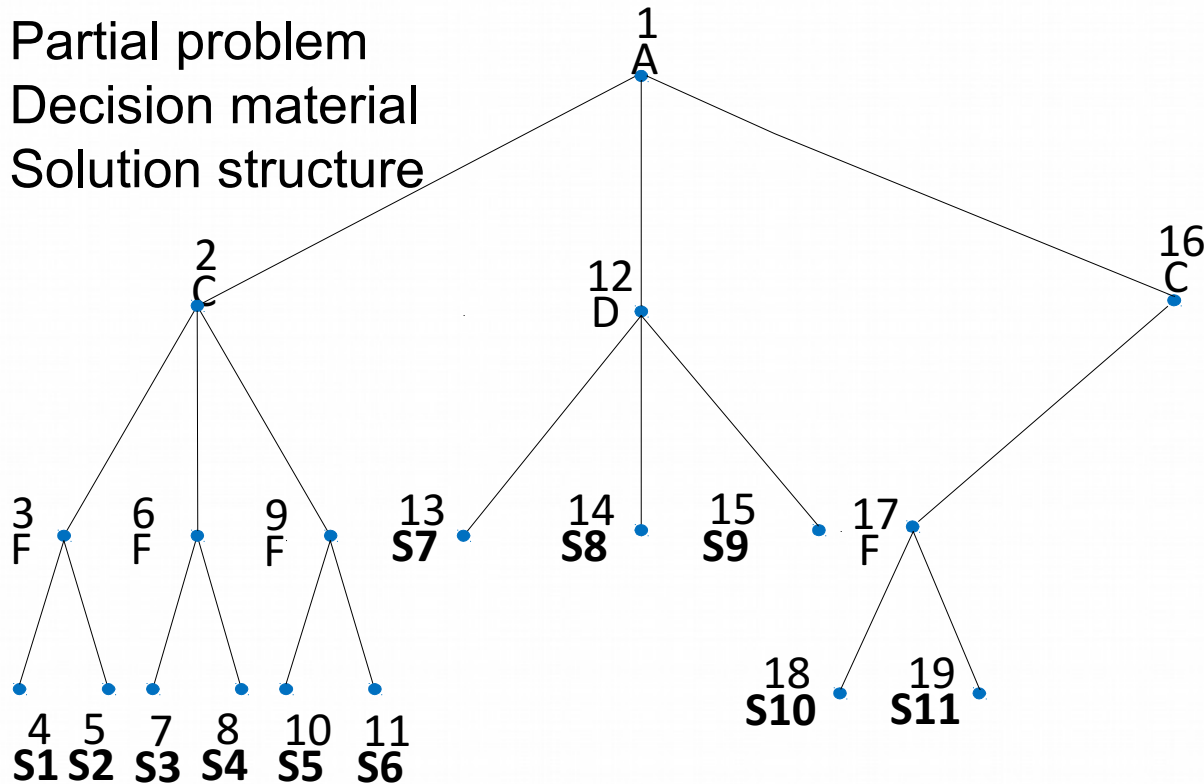
undecided



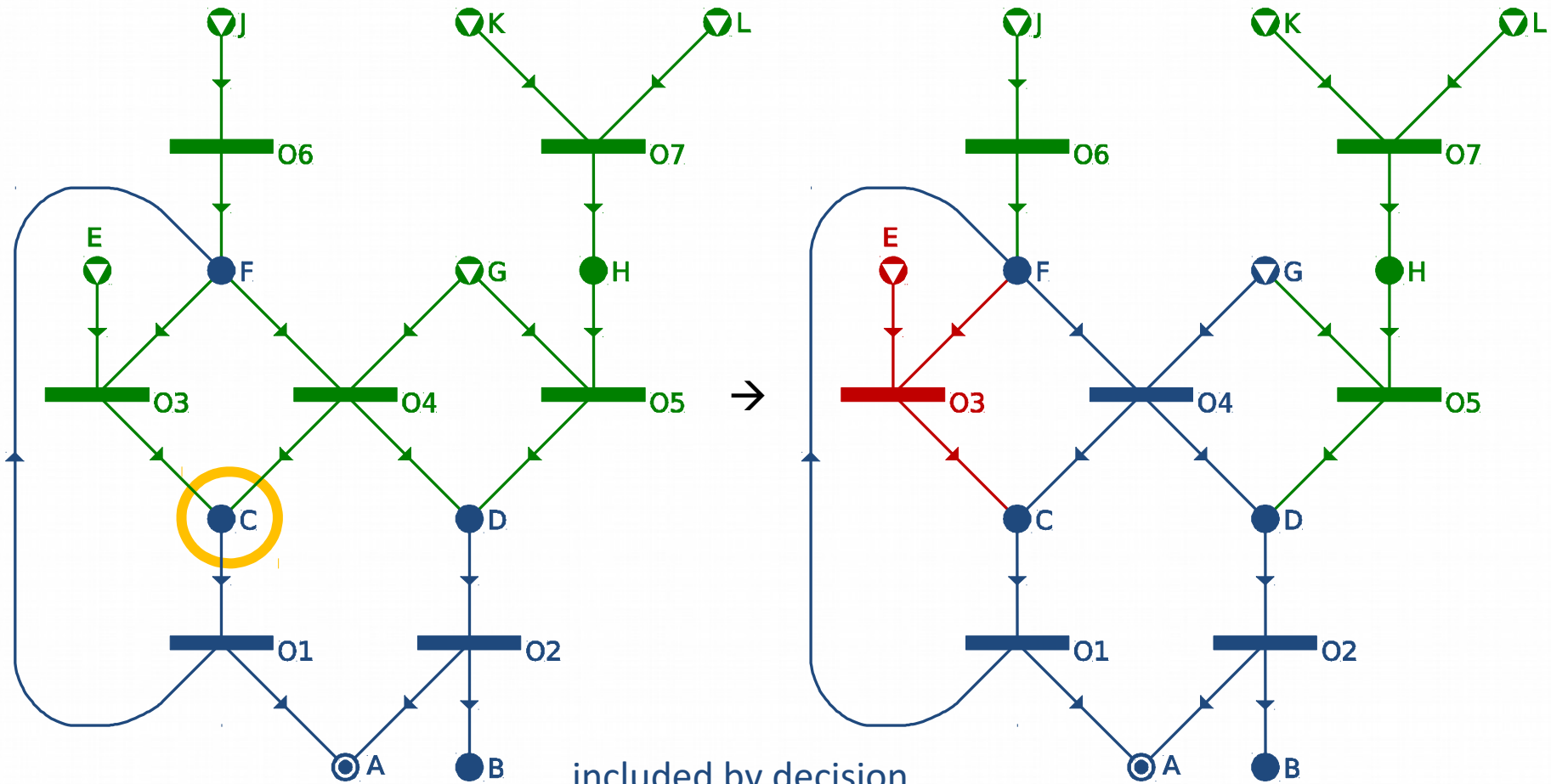
BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Enumeration Tree (Worst Case)

Number: Partial problem
 Letter: Decision material
 S: Solution structure



Partial problem #16 → #20



included by decision

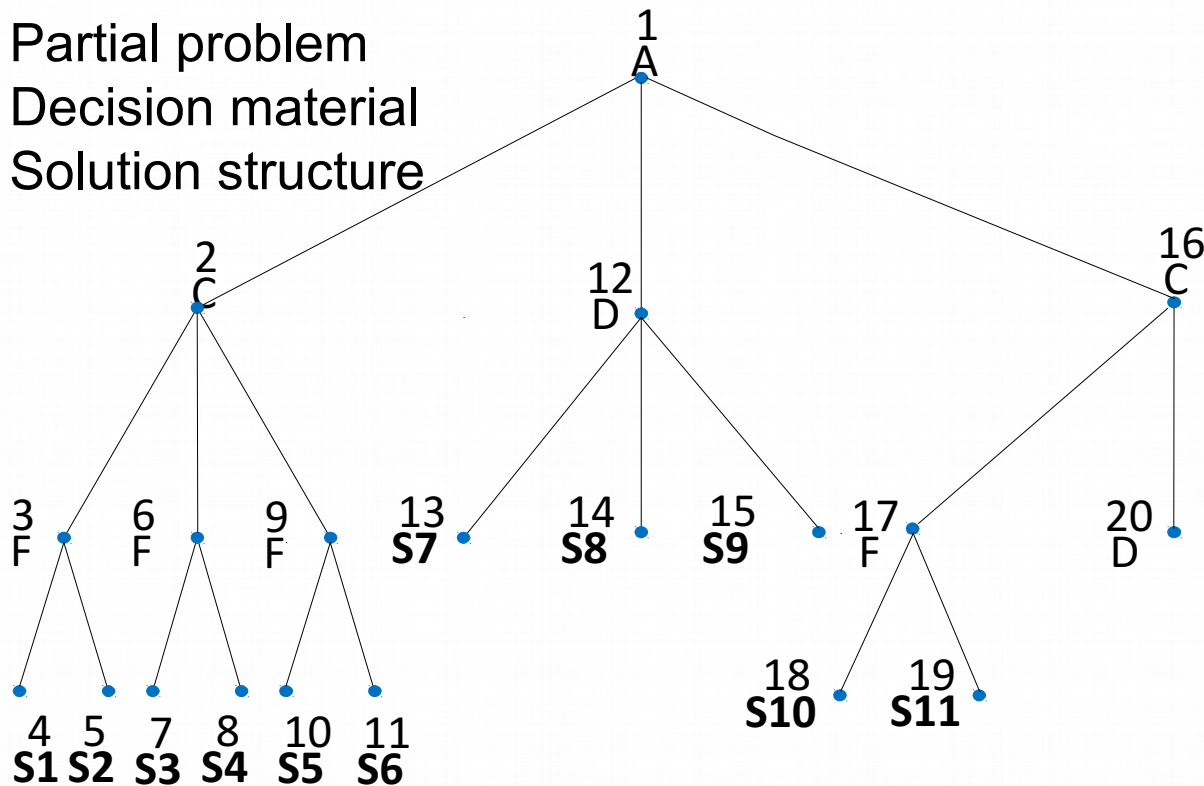
included by neutral extension

excluded by decision

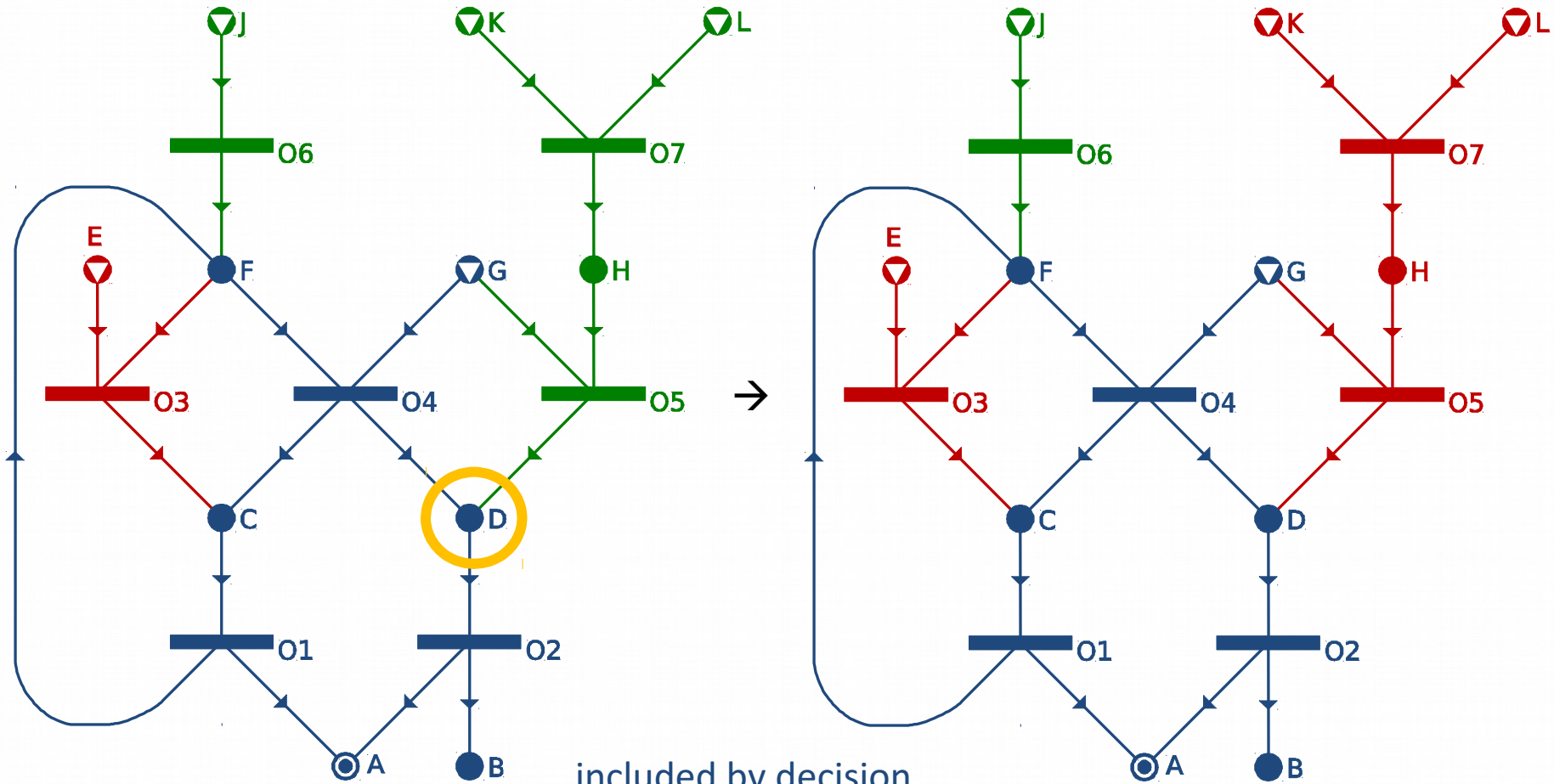
undecided

Enumeration Tree (Worst Case)

Number: Partial problem
 Letter: Decision material
 S: Solution structure



Partial problem #20 → #21



included by decision

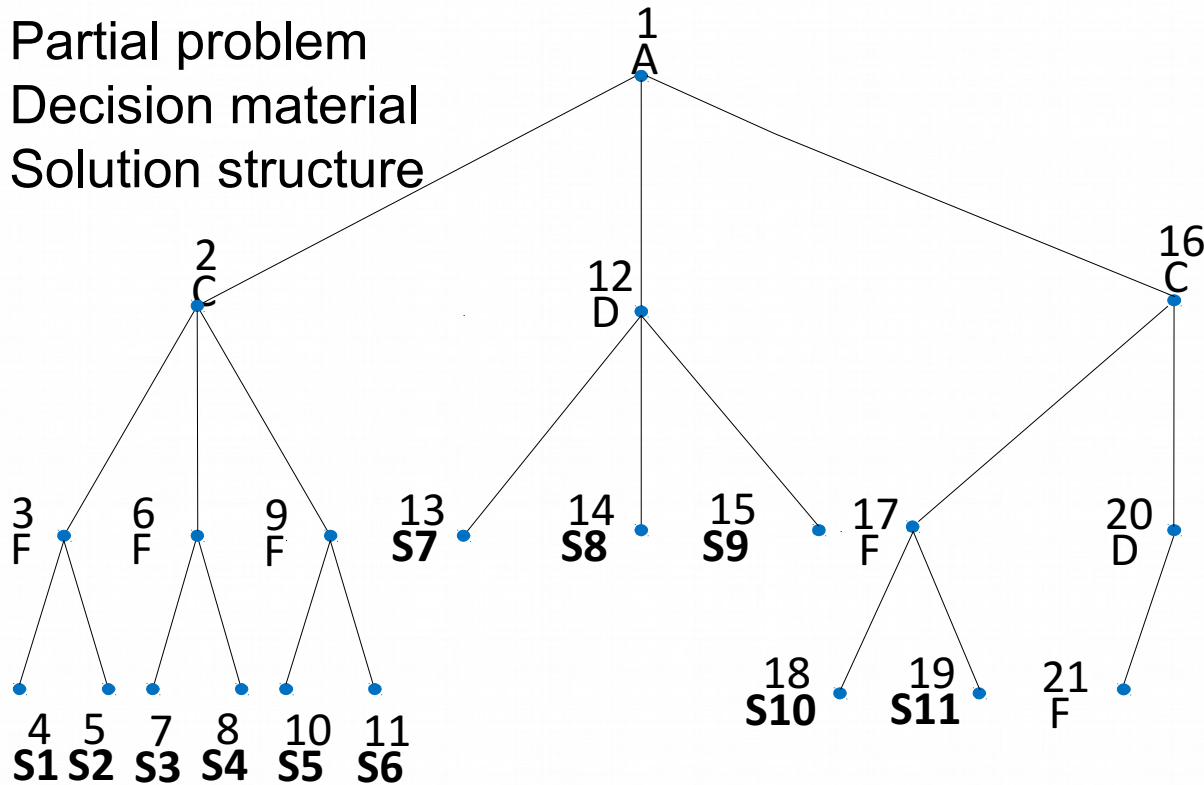
included by neutral extension

excluded by decision

undecided

Enumeration Tree (Worst Case)

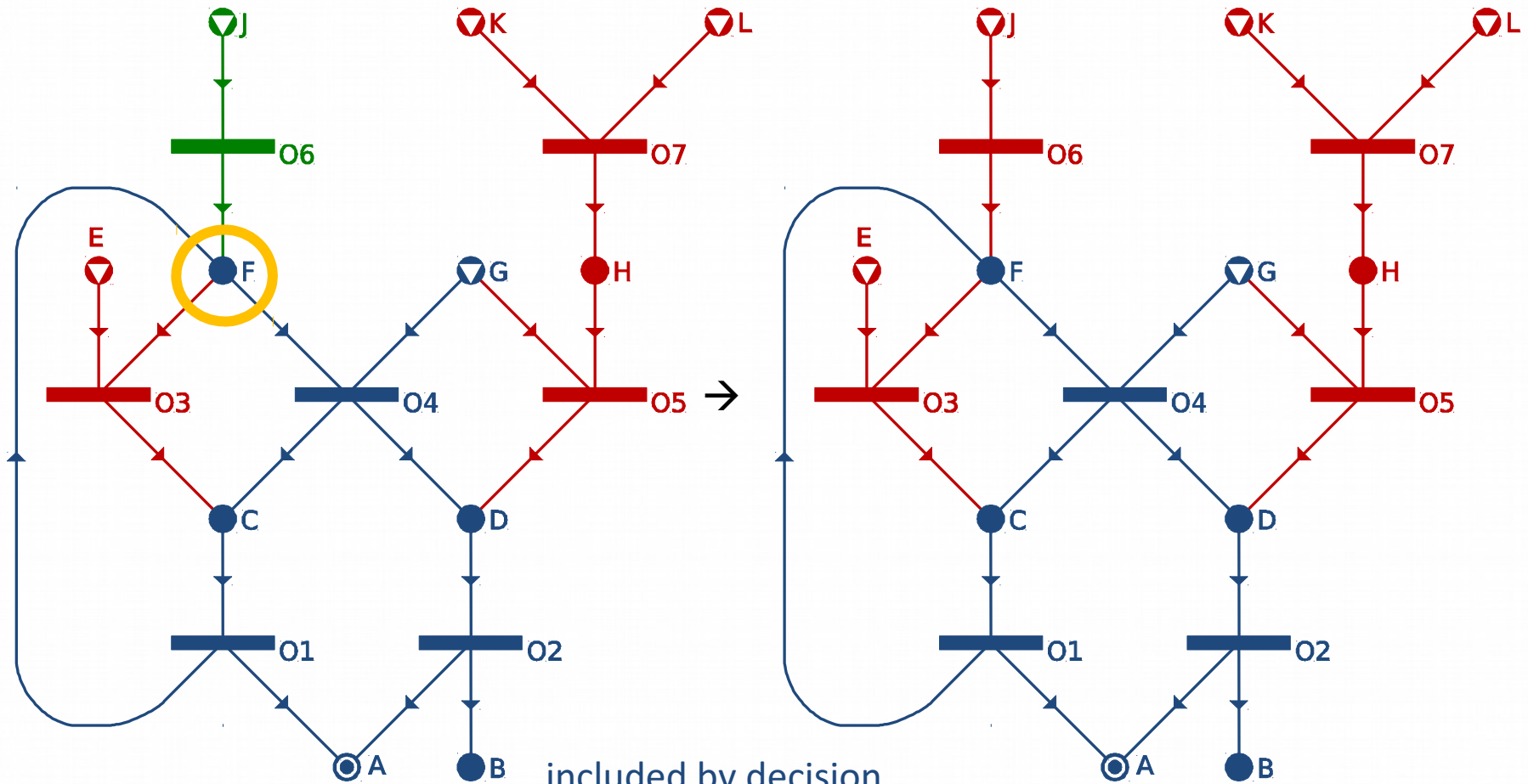
Number: Partial problem
 Letter: Decision material
 S: Solution structure



Partial problem #21 → #22 (Structure S12)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



included by decision

included by neutral extension

excluded by decision

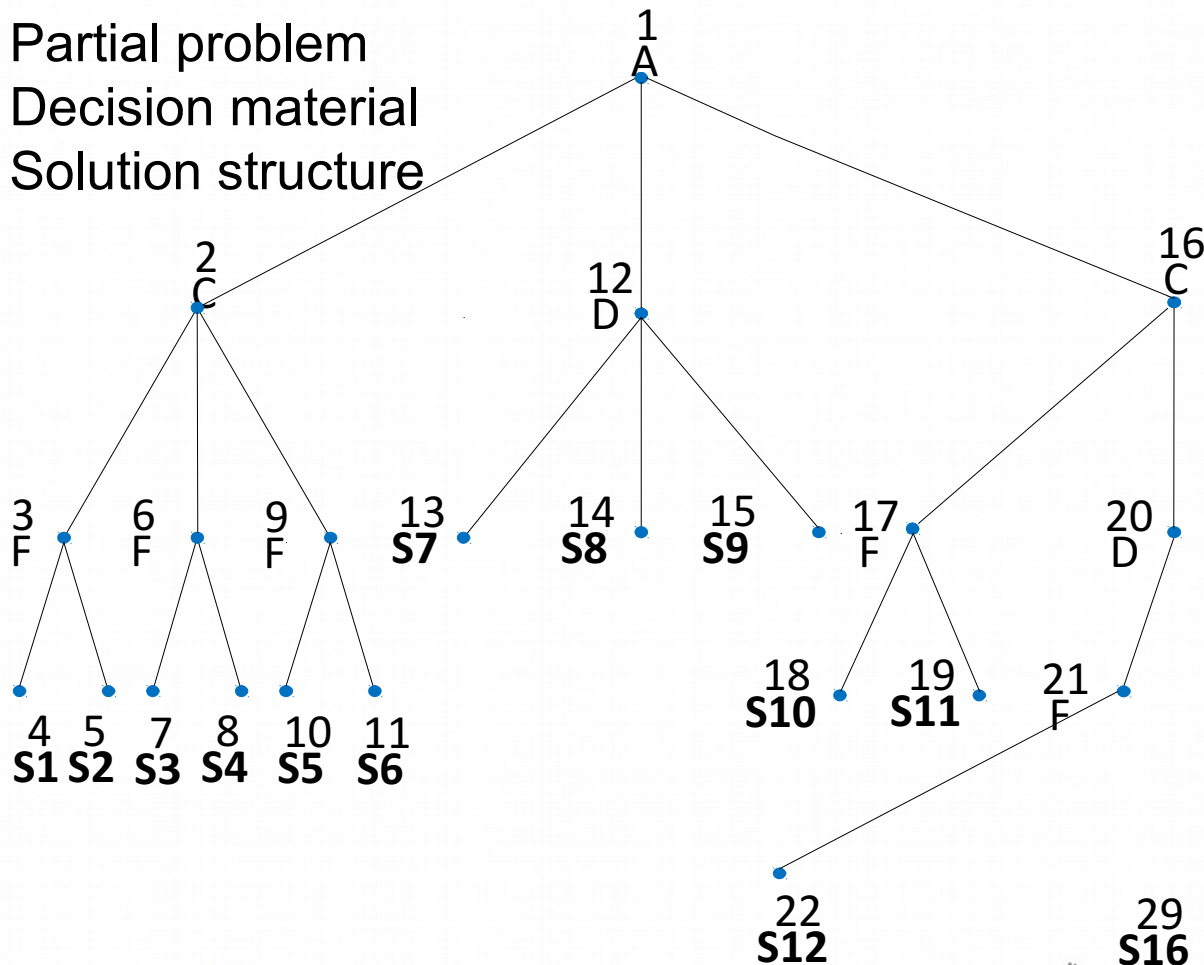
undecided



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Enumeration Tree (Worst Case)

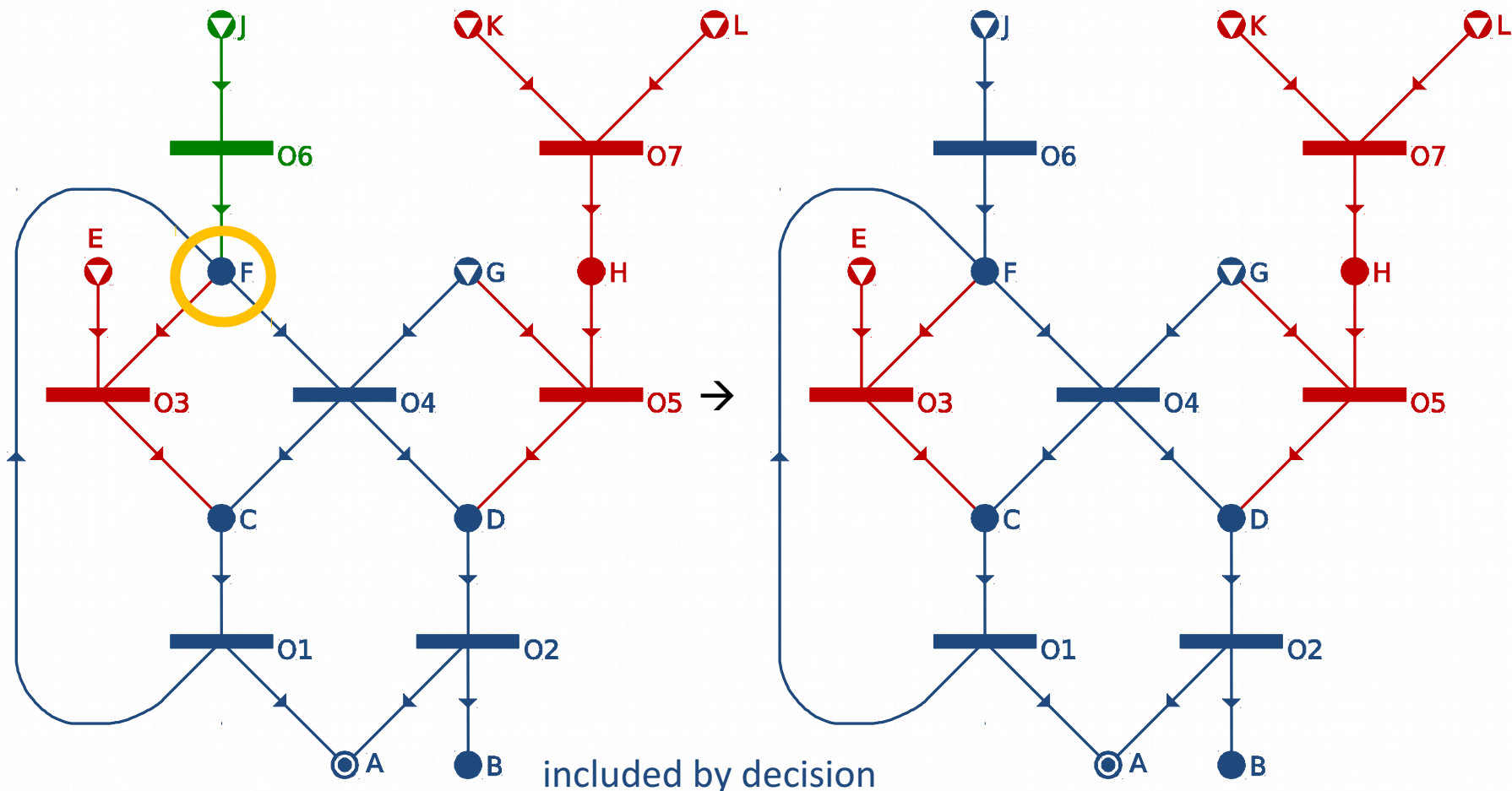
Number: Partial problem
 Letter: Decision material
 S: Solution structure



Partial problem #21 → #23 (Structure S13)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



included by decision

included by neutral extension

excluded by decision

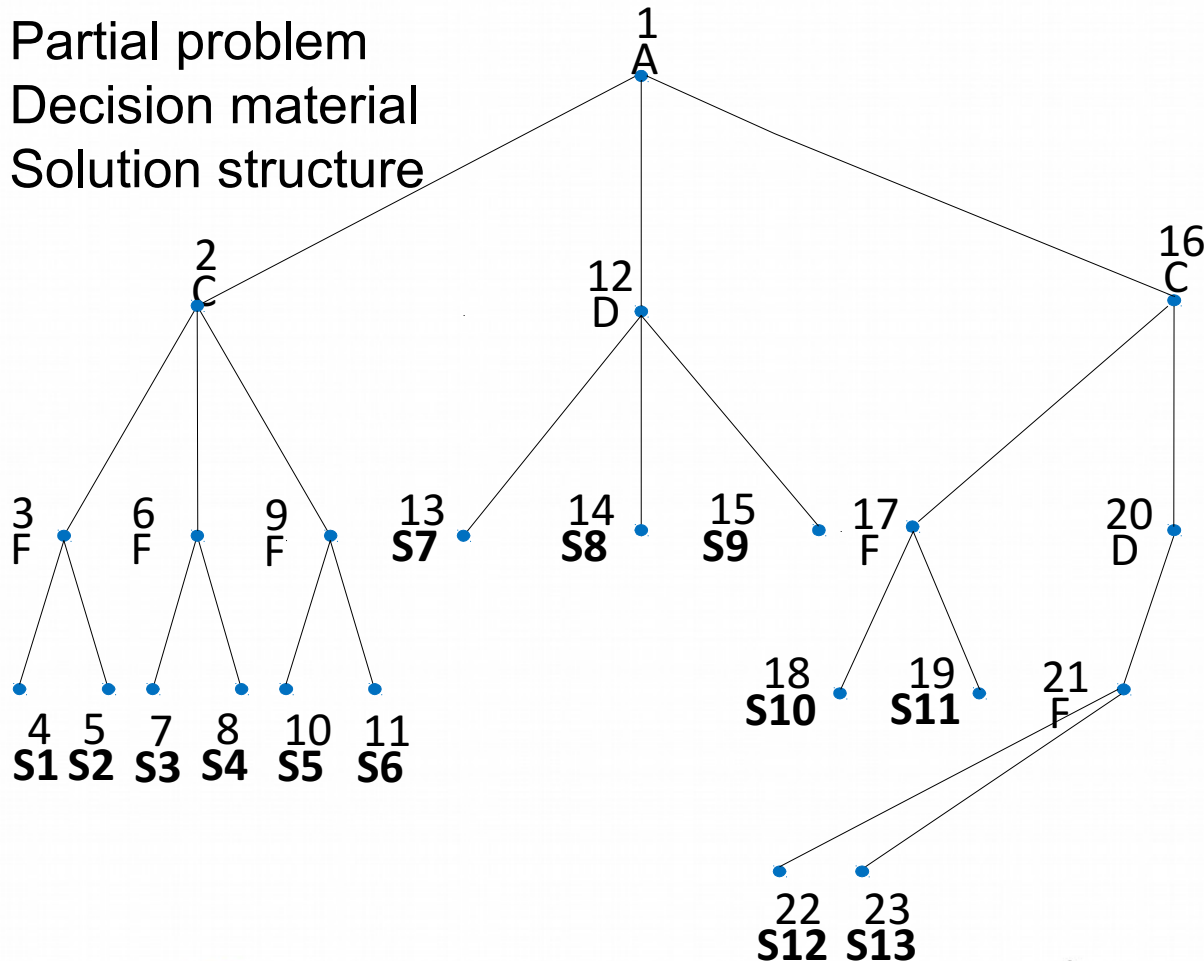
undecided



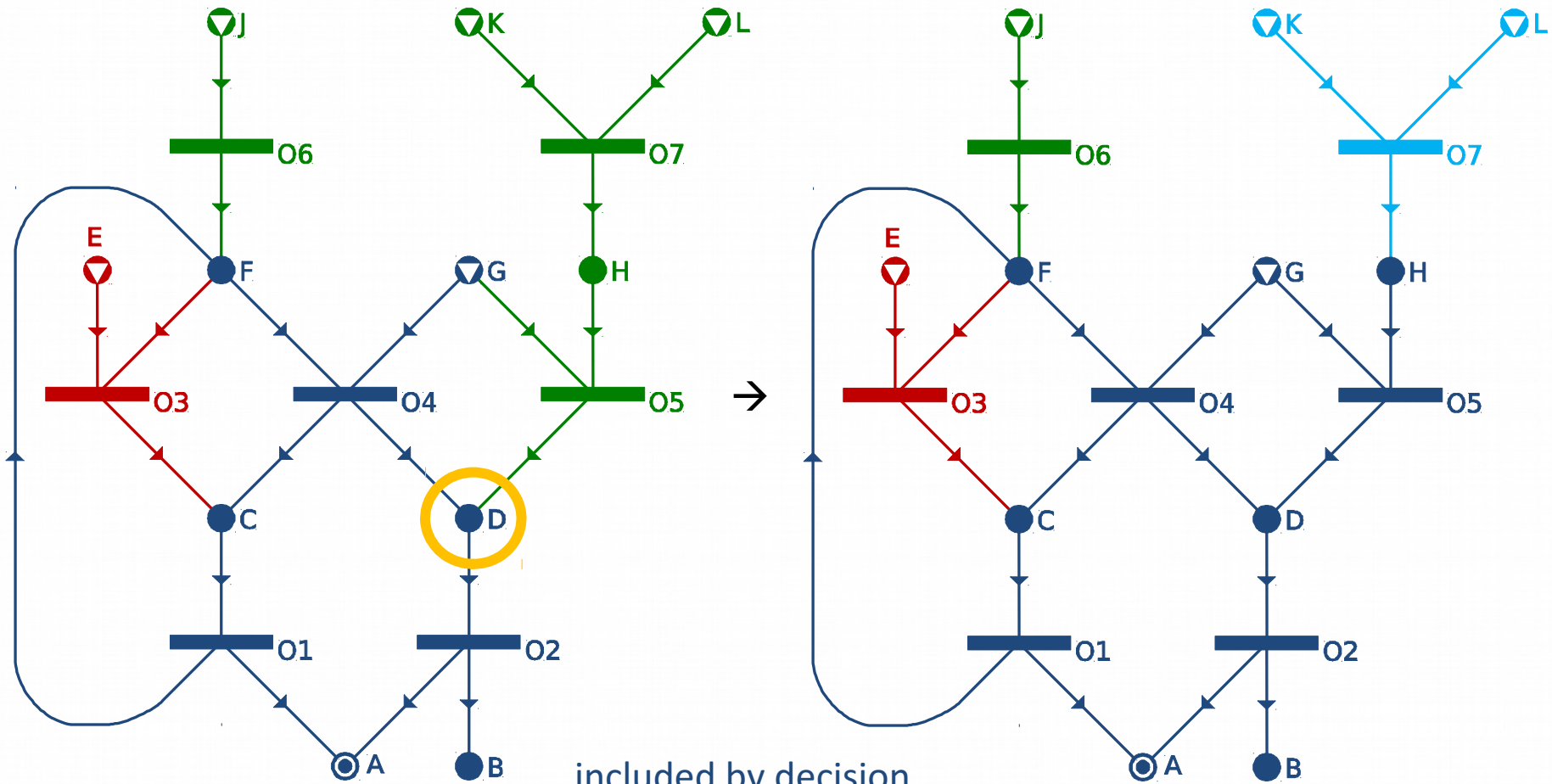
BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Enumeration Tree (Worst Case)

Number: Partial problem
 Letter: Decision material
 S: Solution structure



Partial problem #20 → #24



included by decision

included by neutral extension

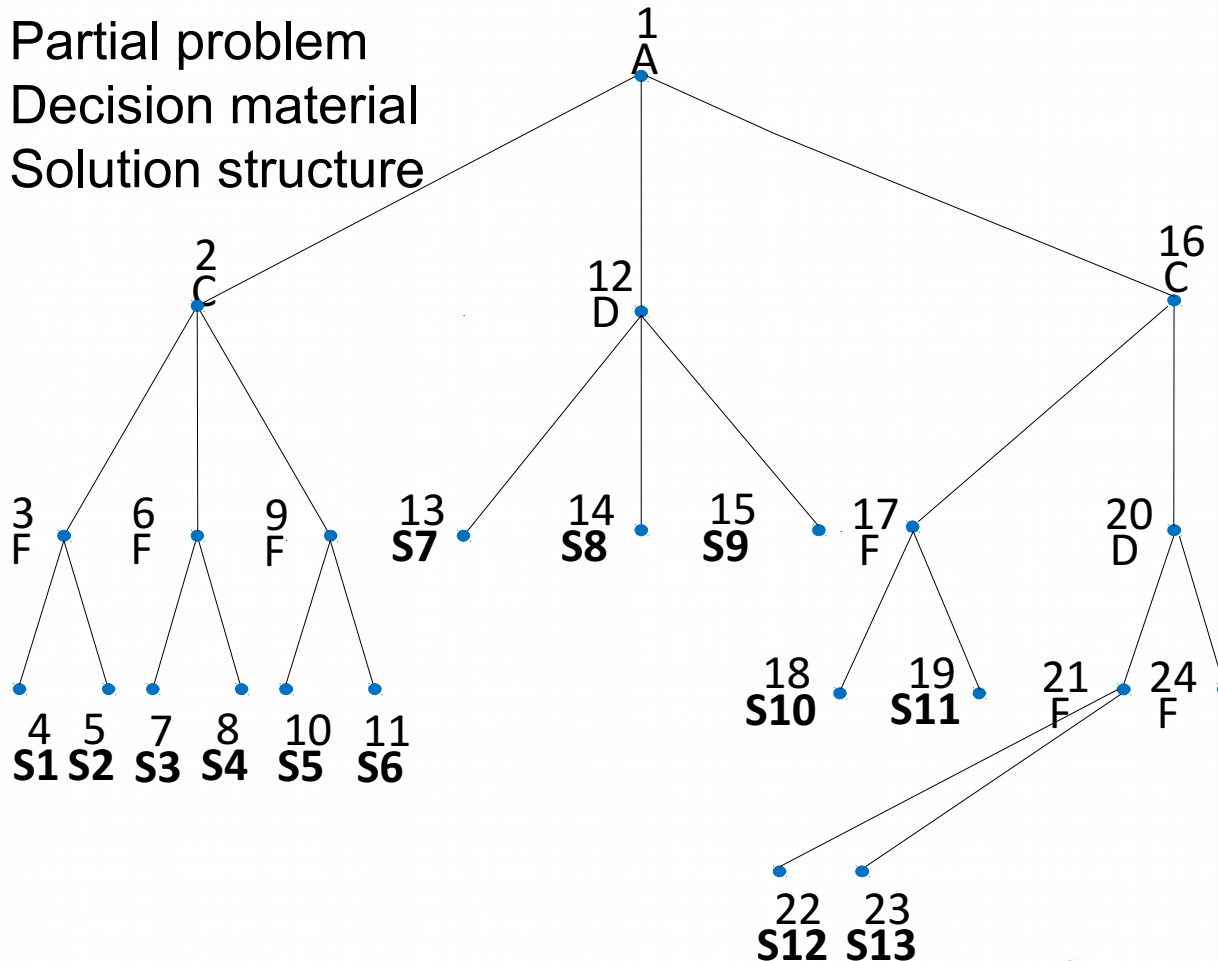
excluded by decision

undecided

Enumeration Tree (Worst Case)

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

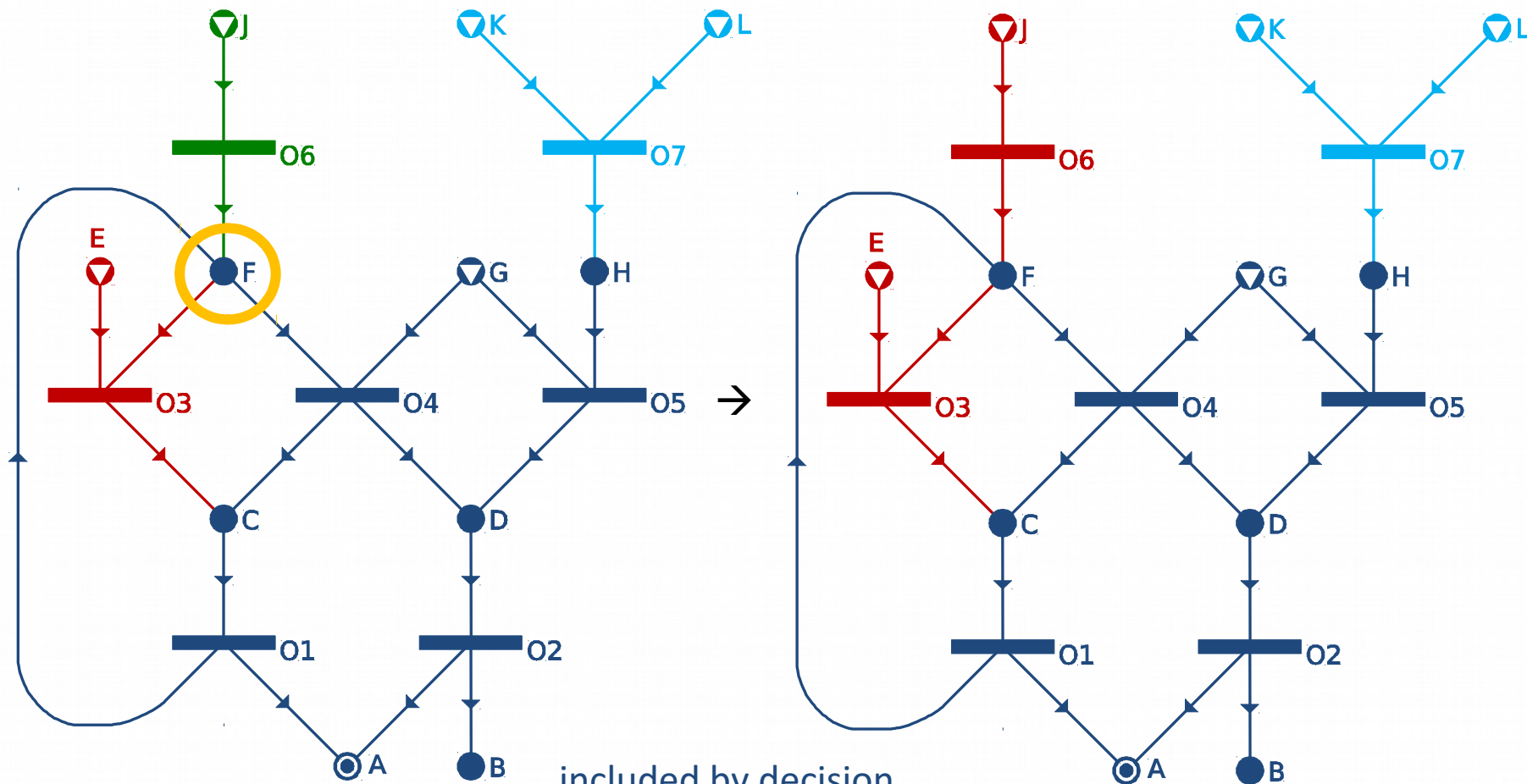
Number: Partial problem
 Letter: Decision material
 S: Solution structure



Partial problem #24 → #25 (Structure S14)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



included by decision

included by neutral extension

excluded by decision

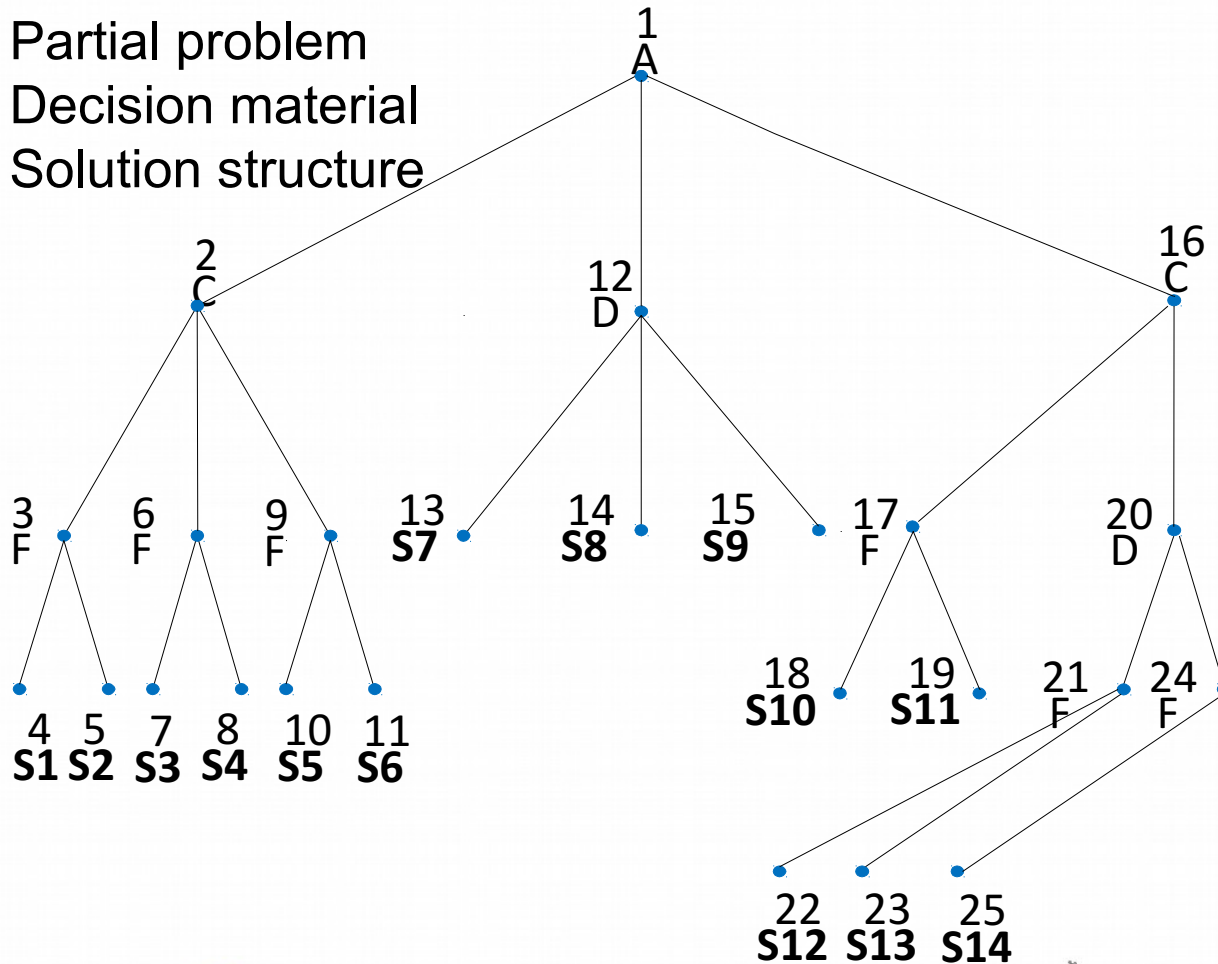
undecided



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Enumeration Tree (Worst Case)

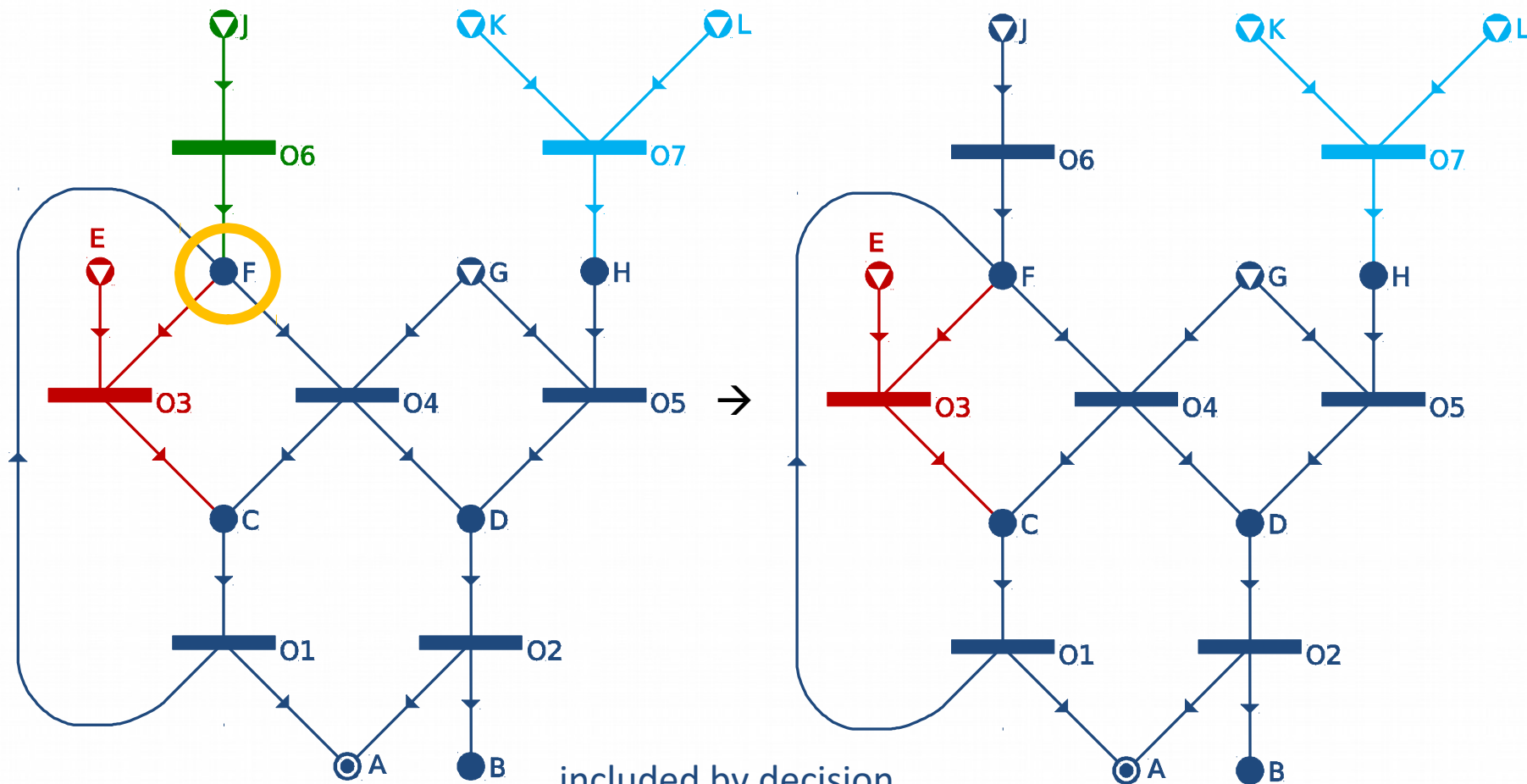
Number: Partial problem
 Letter: Decision material
 S: Solution structure



Partial problem #24 → #26 (Structure S15)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



included by decision

included by neutral extension

excluded by decision

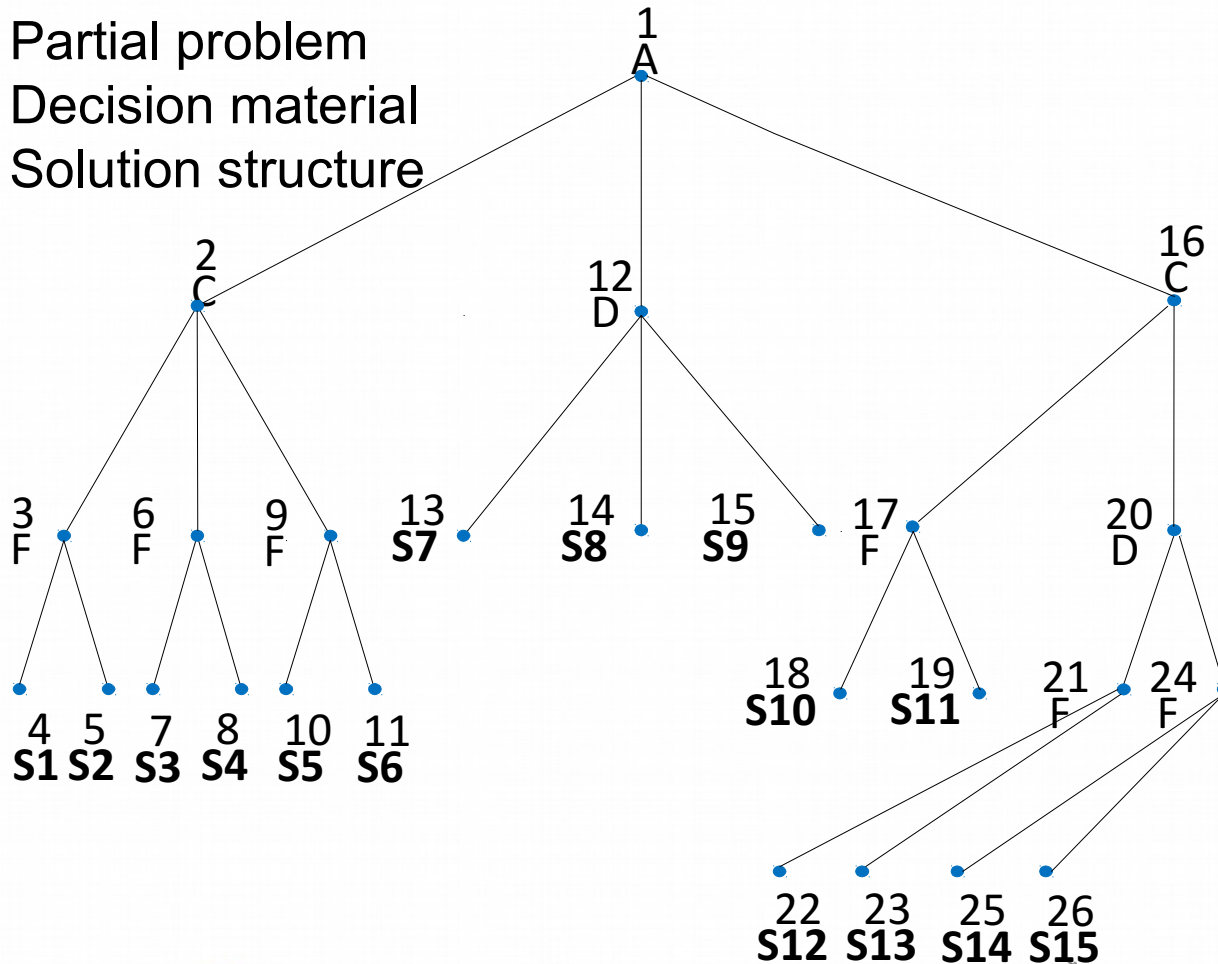
undecided



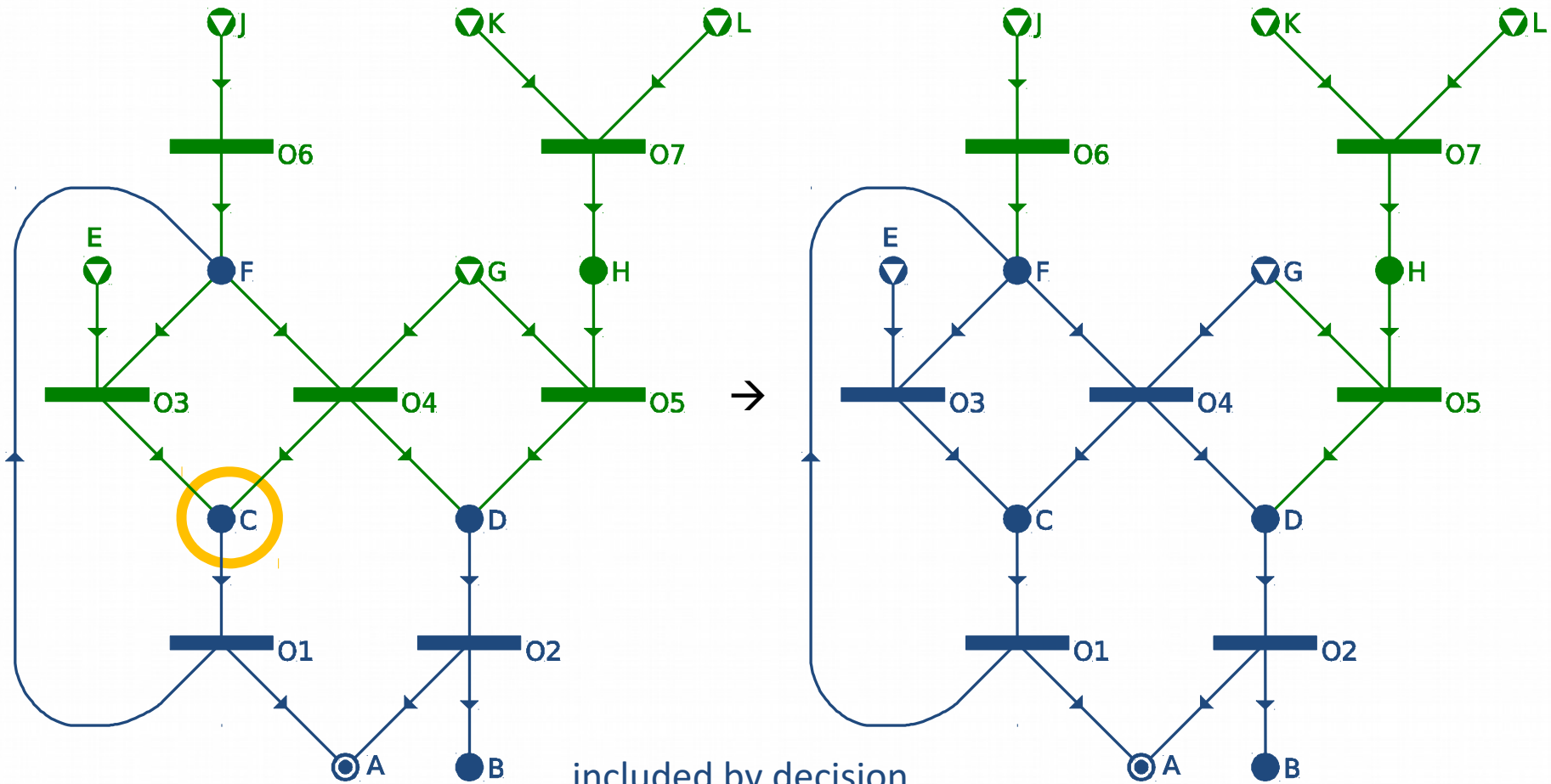
BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Enumeration Tree (Worst Case)

Number: Partial problem
 Letter: Decision material
 S: Solution structure



Partial problem #16 → #27



included by decision

included by neutral extension

excluded by decision

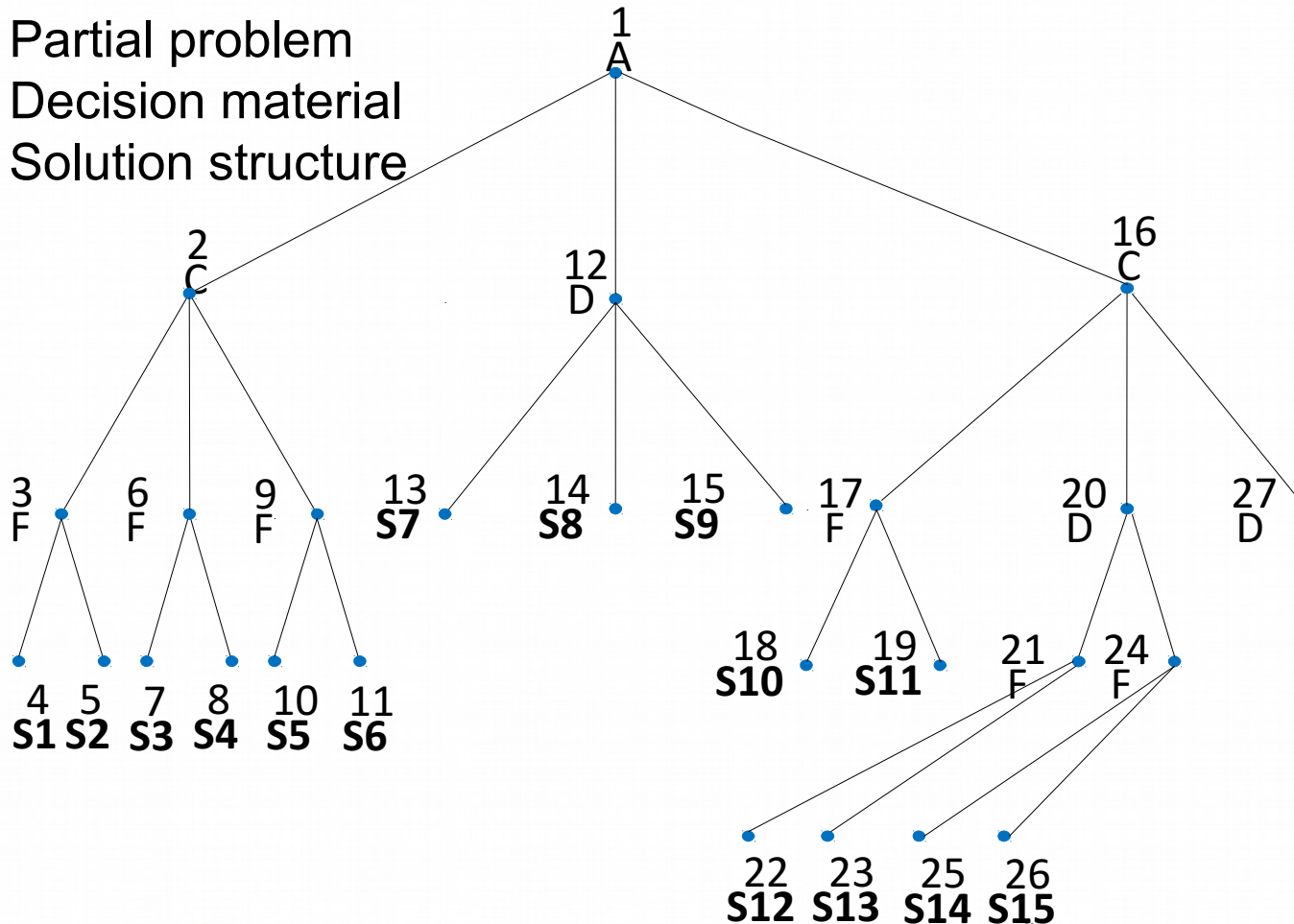
undecided



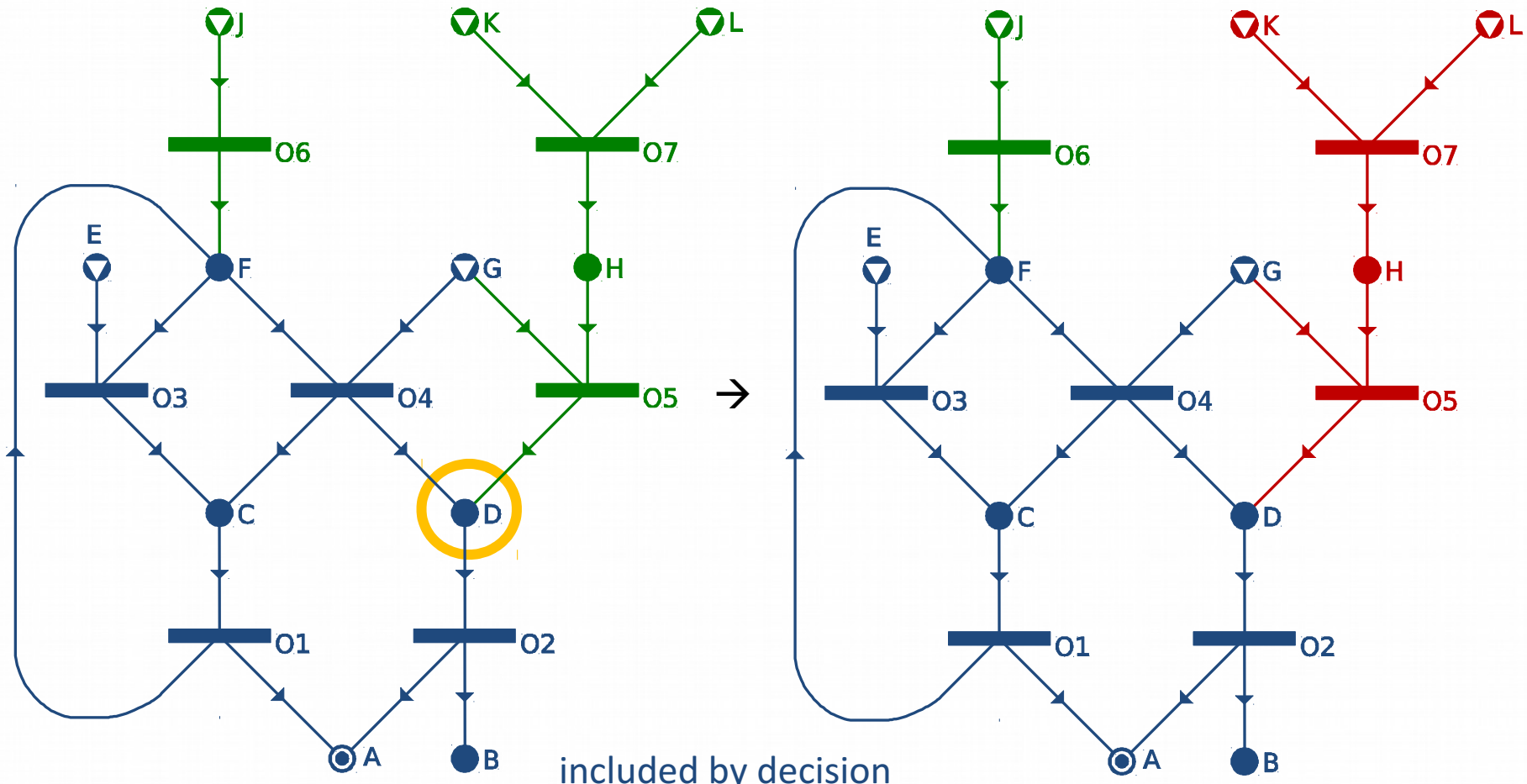
BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Enumeration Tree (Worst Case)

Number: Partial problem
 Letter: Decision material
 S: Solution structure



Partial problem #27 → #28



included by decision

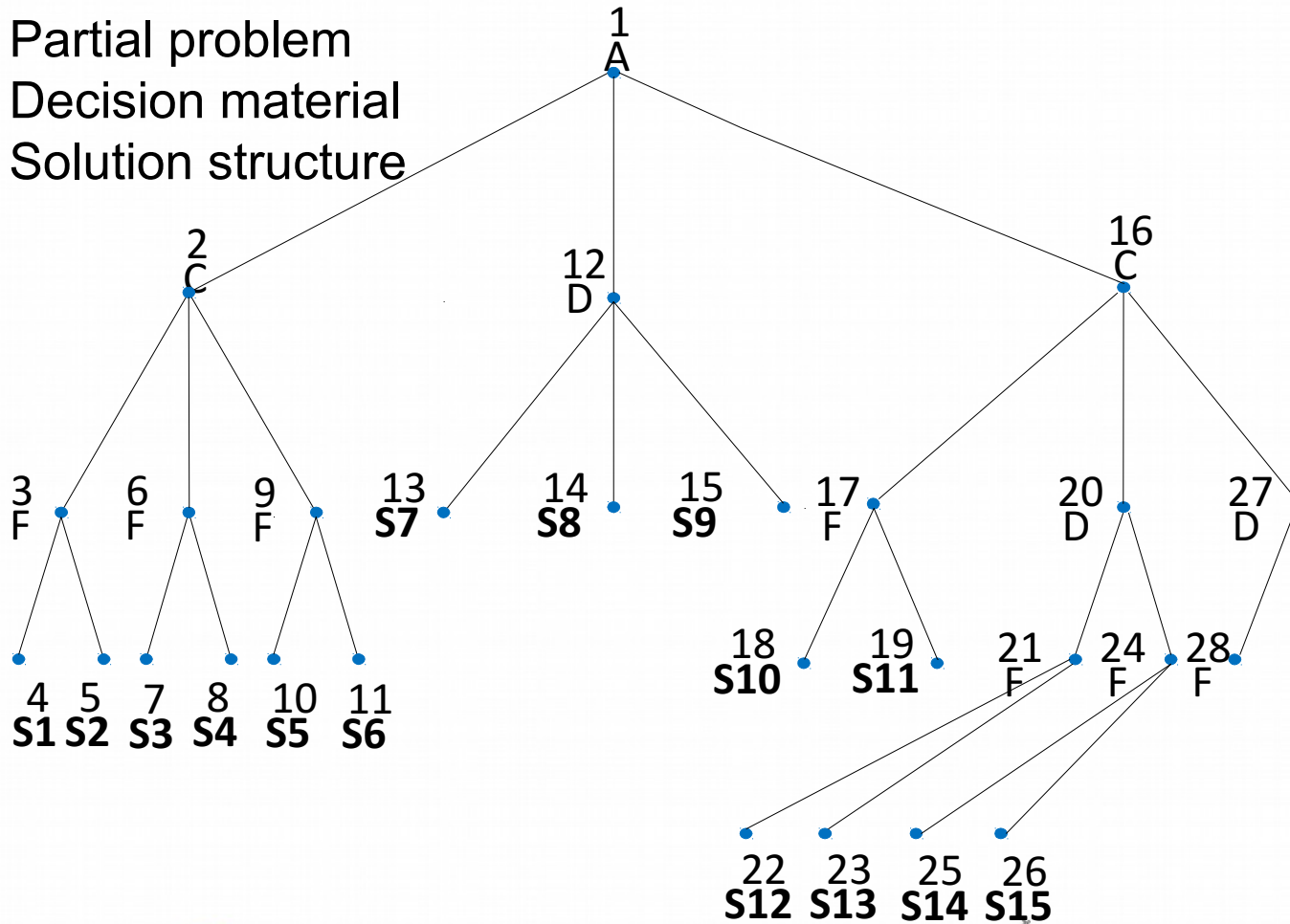
included by neutral extension

excluded by decision

undecided

Enumeration Tree (Worst Case)

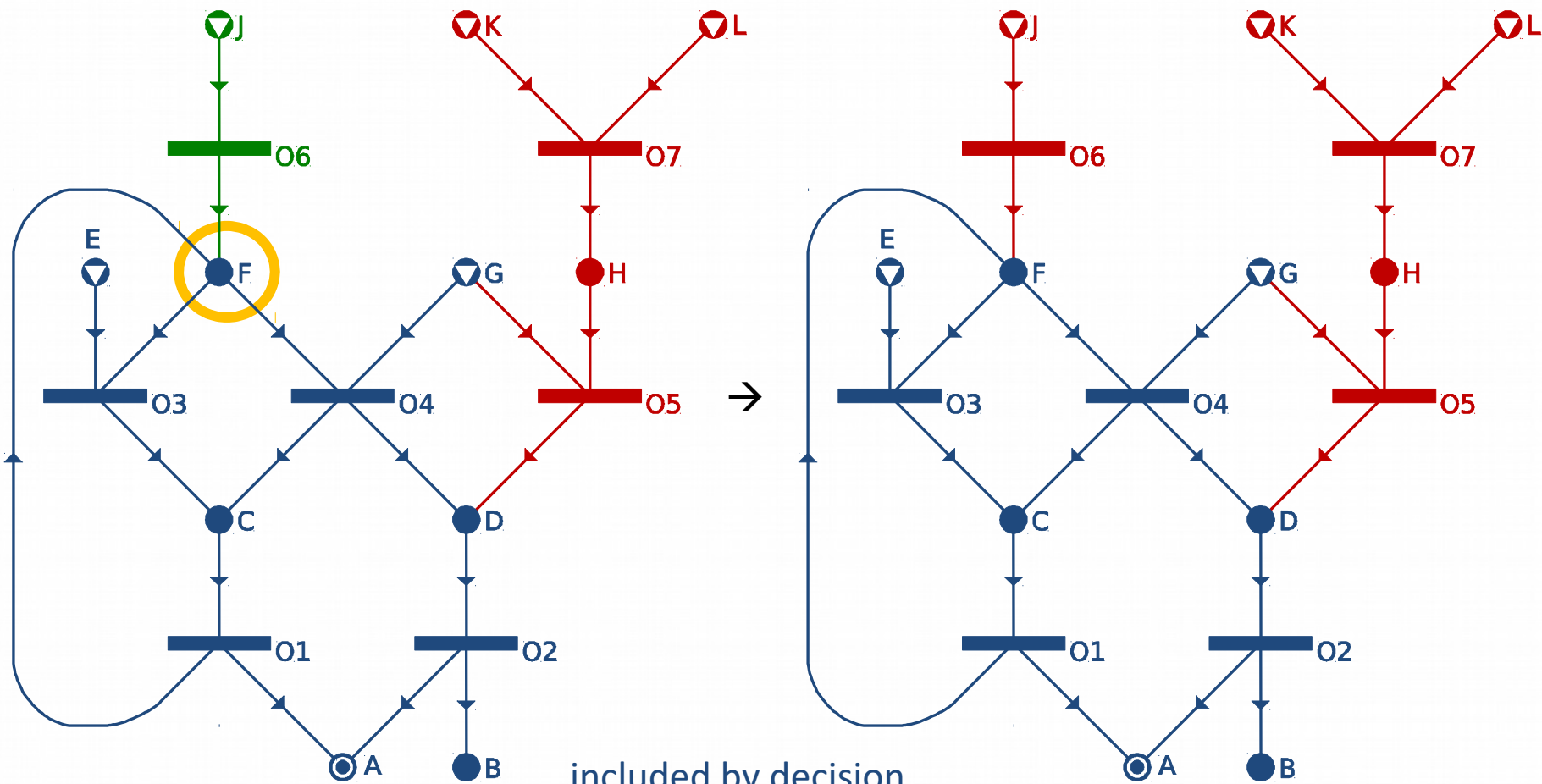
Number: Partial problem
 Letter: Decision material
 S: Solution structure



Partial problem #28 → #29 (Structure S16)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



included by decision

included by neutral extension

excluded by decision

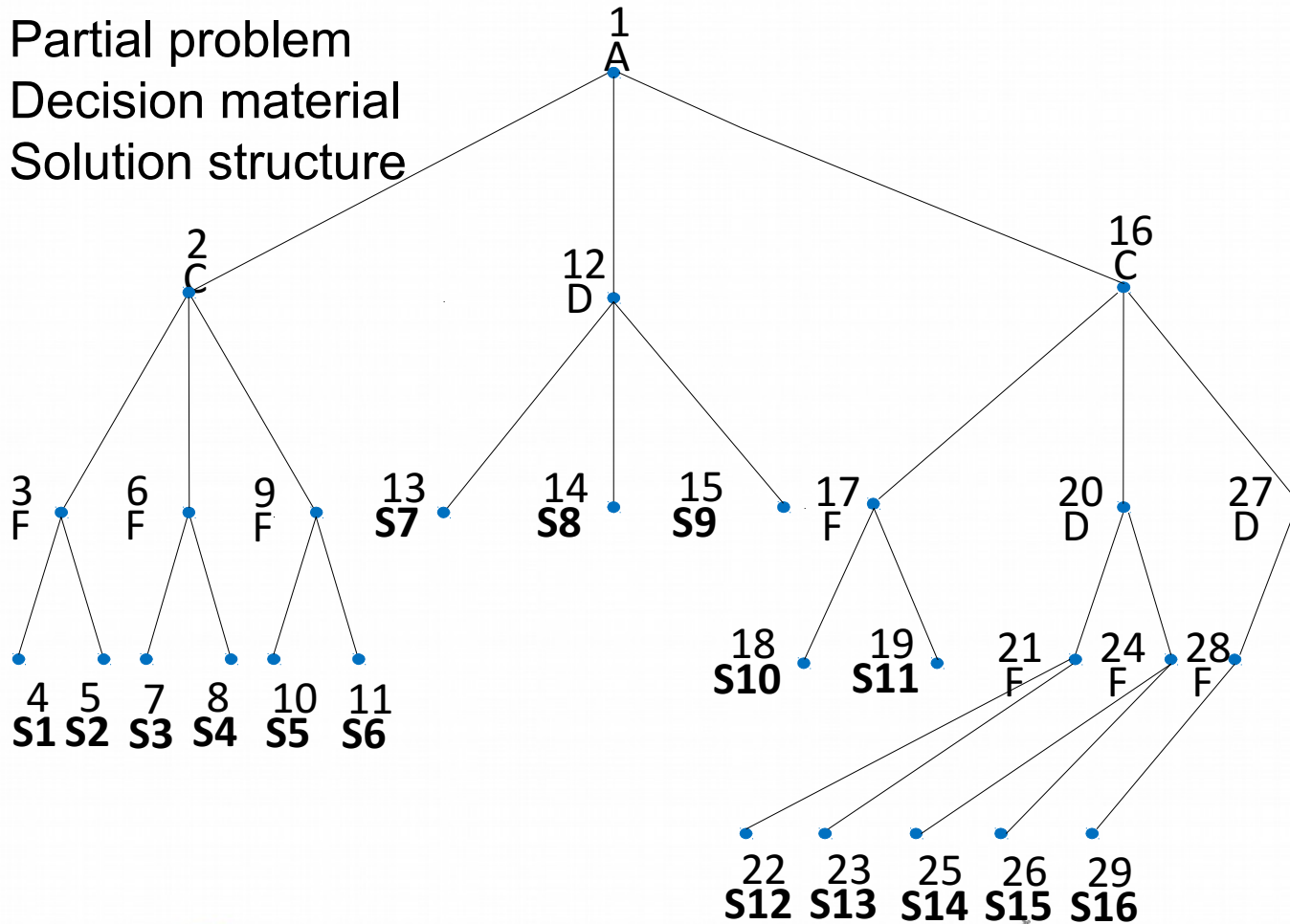
undecided



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Enumeration Tree (Worst Case)

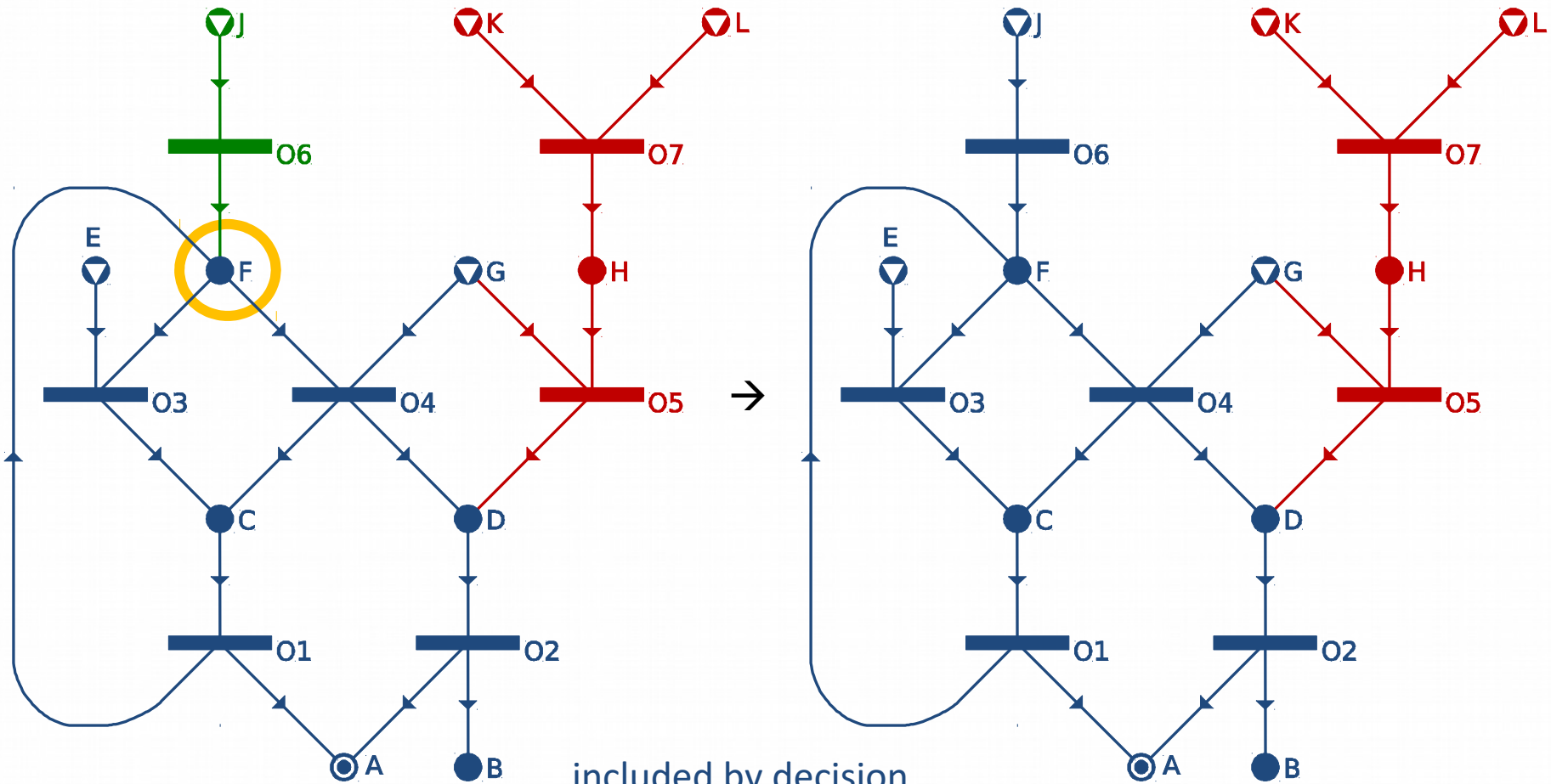
Number: Partial problem
 Letter: Decision material
 S: Solution structure



Partial problem #28 → #30 (Structure S17)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



included by decision

included by neutral extension

excluded by decision

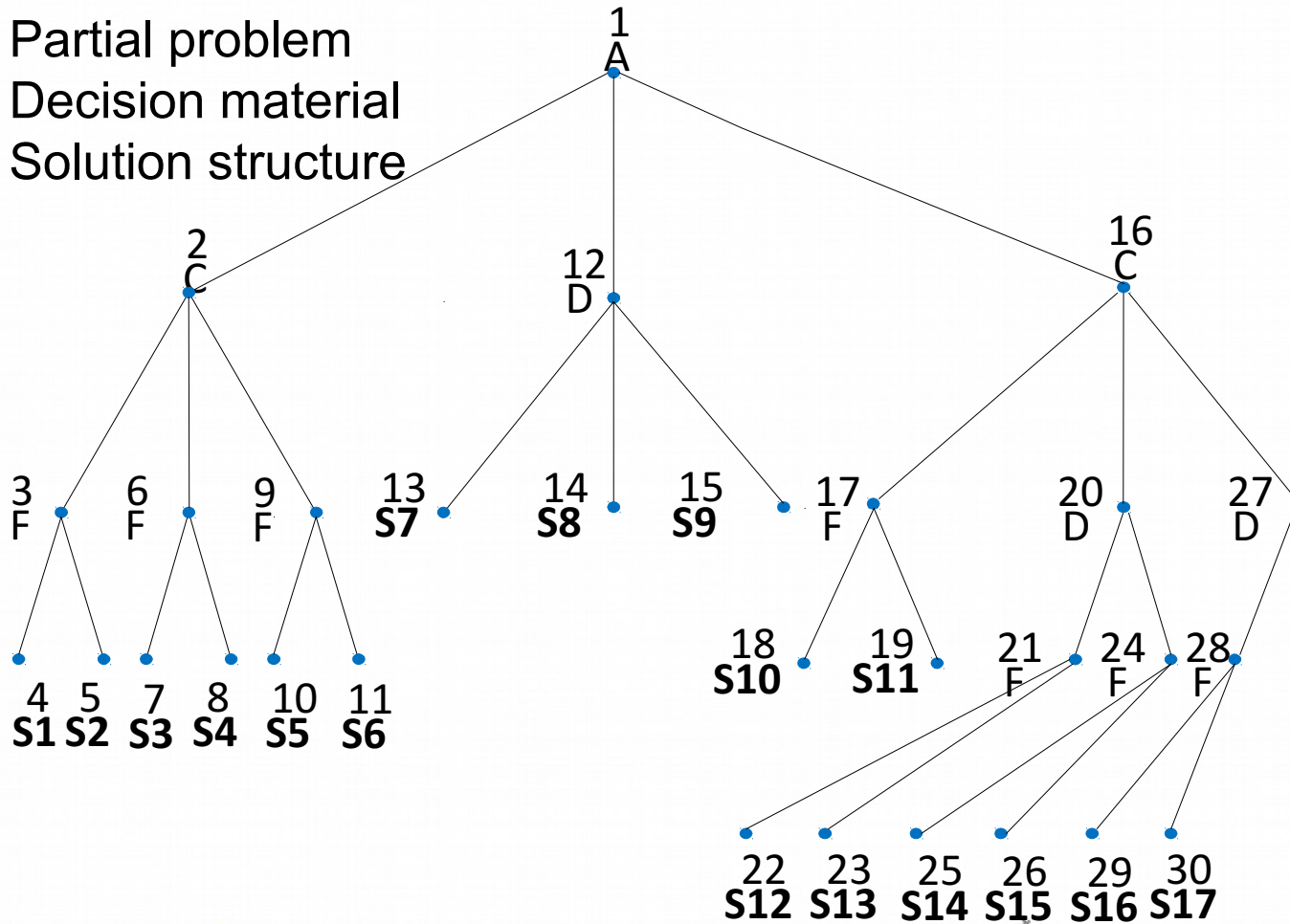
undecided



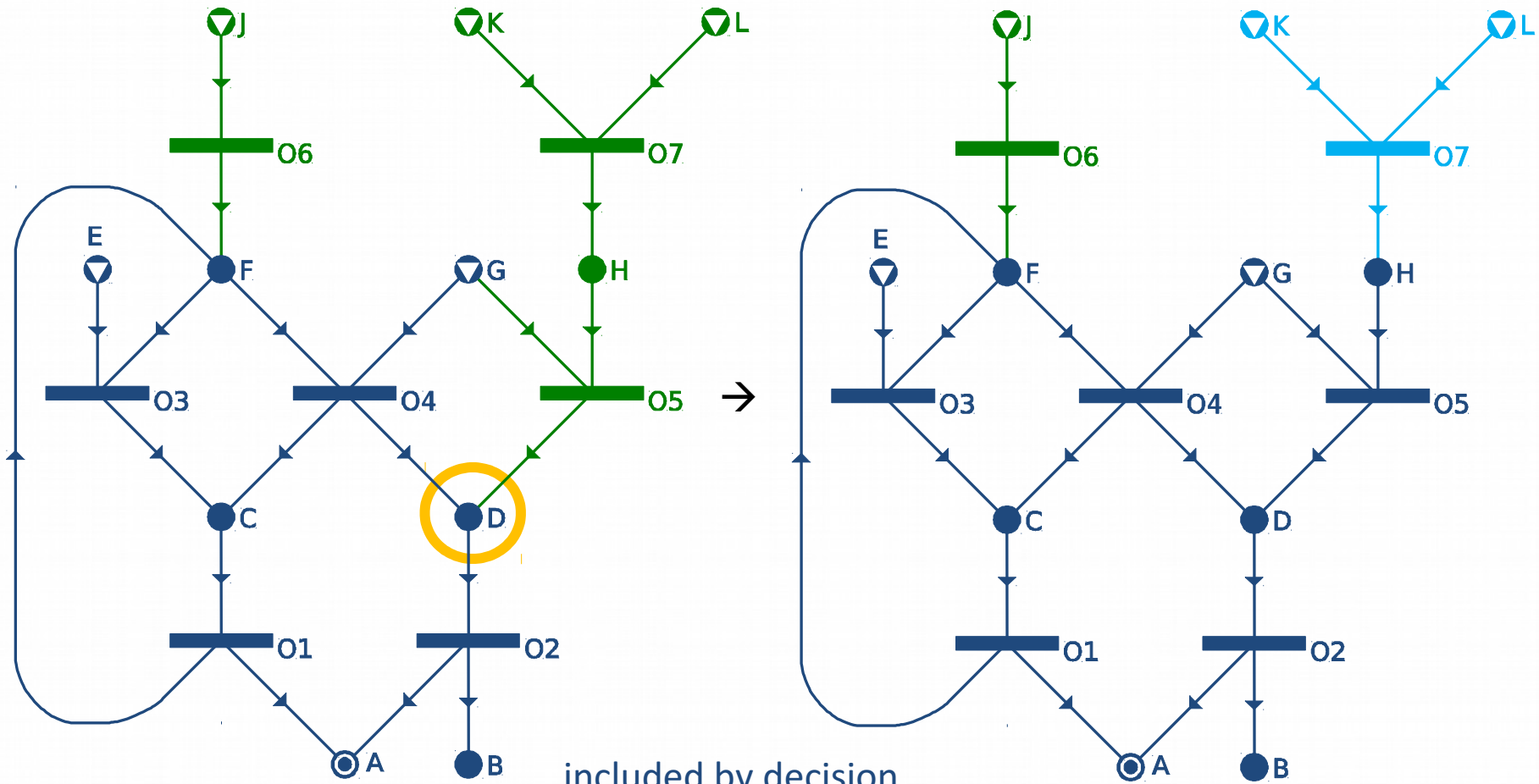
BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Enumeration Tree (Worst Case)

Number: Partial problem
 Letter: Decision material
 S: Solution structure



Partial problem #27 → #31



included by decision

included by neutral extension

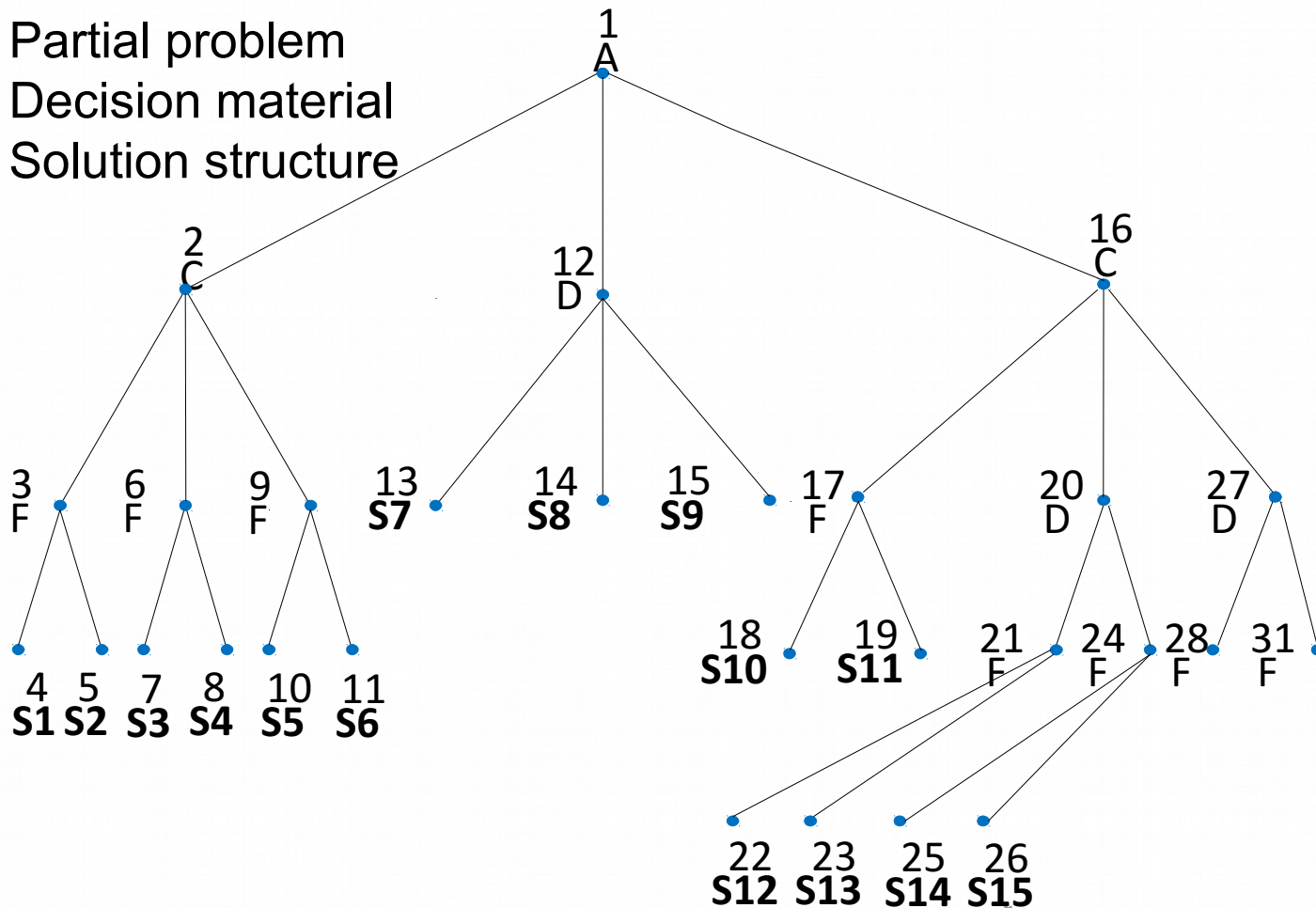
excluded by decision

undecided

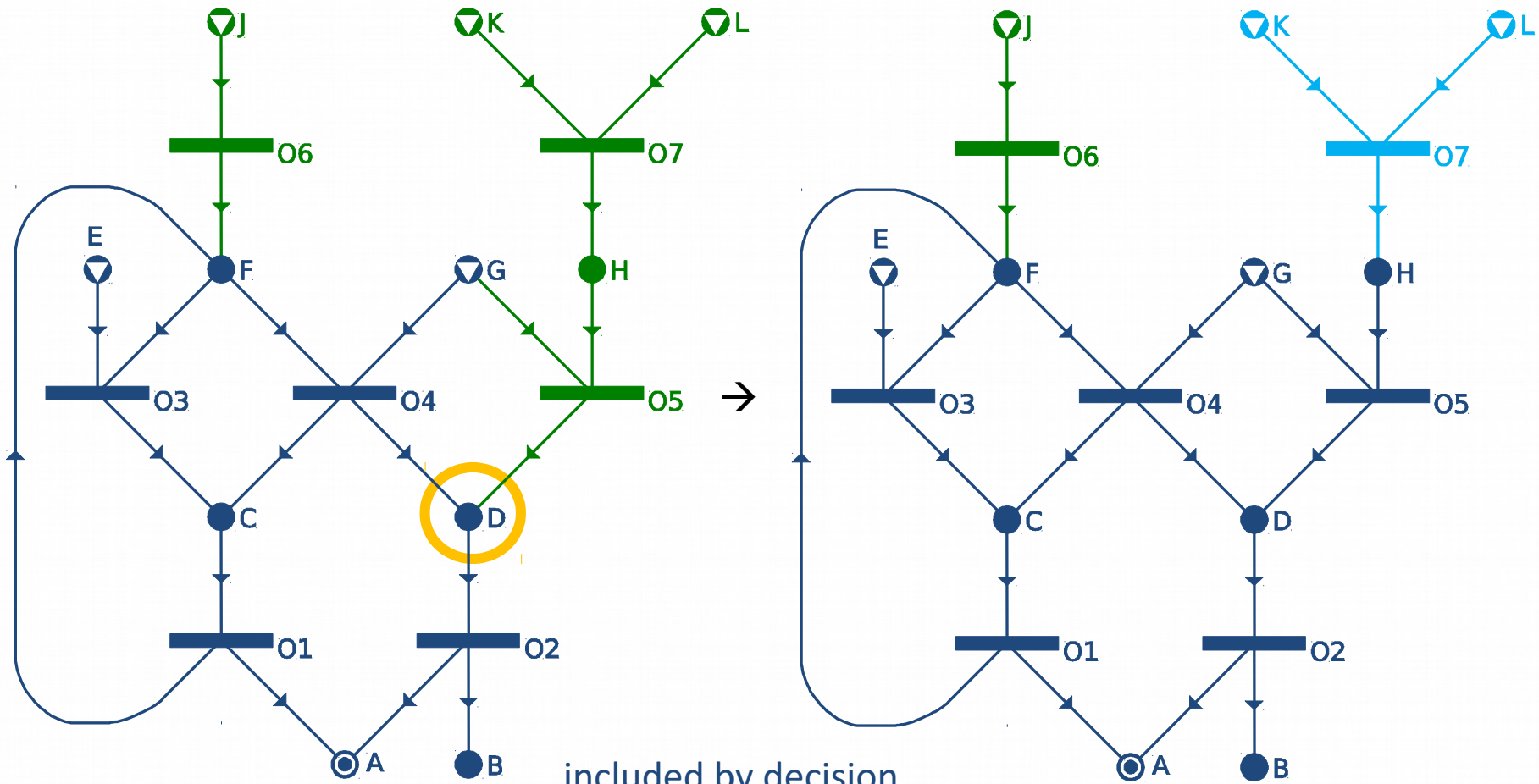


Enumeration Tree (Worst Case)

Number: Partial problem
 Letter: Decision material
 S: Solution structure



Partial problem #27 → #31



included by decision

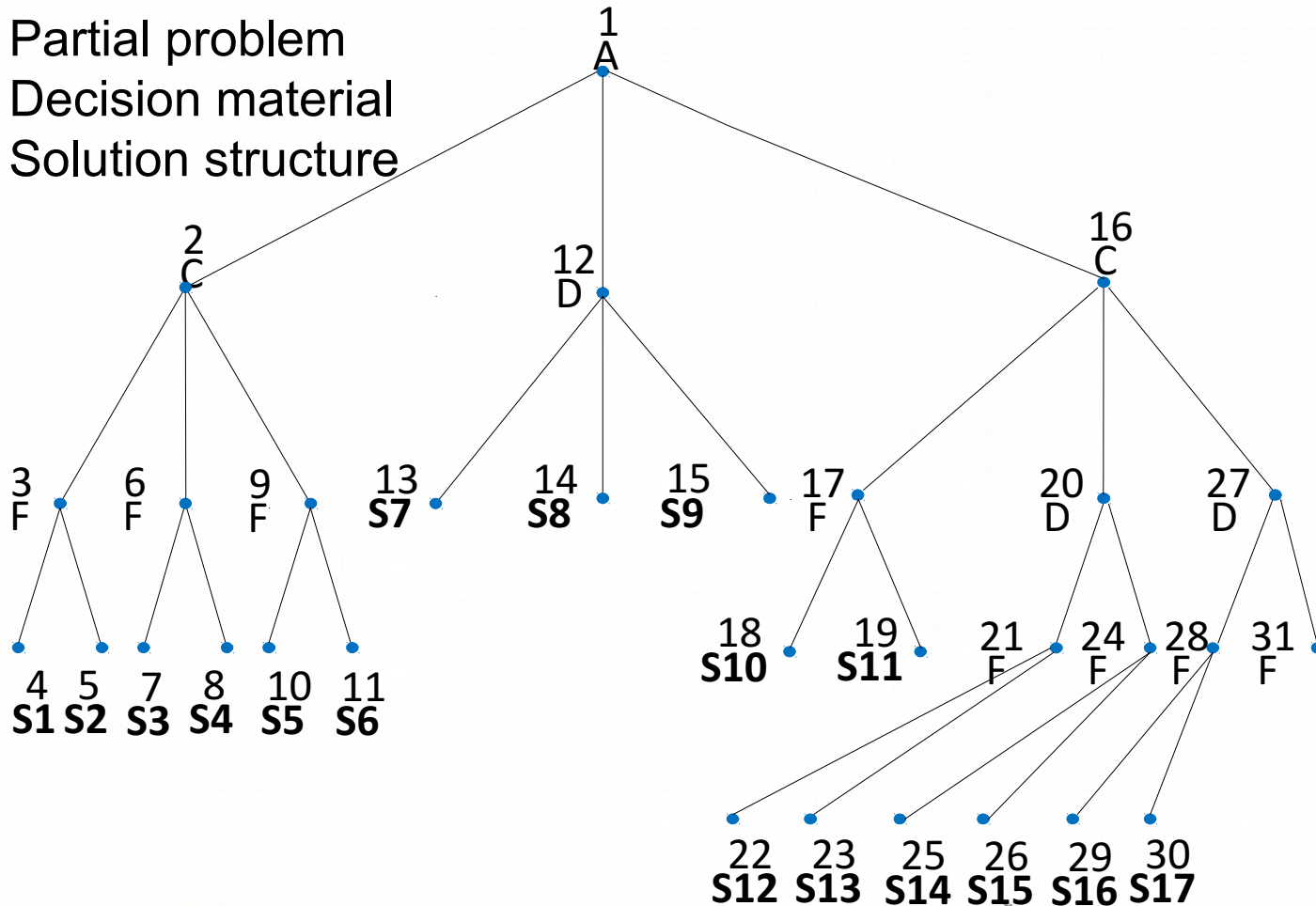
included by neutral extension

excluded by decision

undecided

Enumeration Tree (Worst Case)

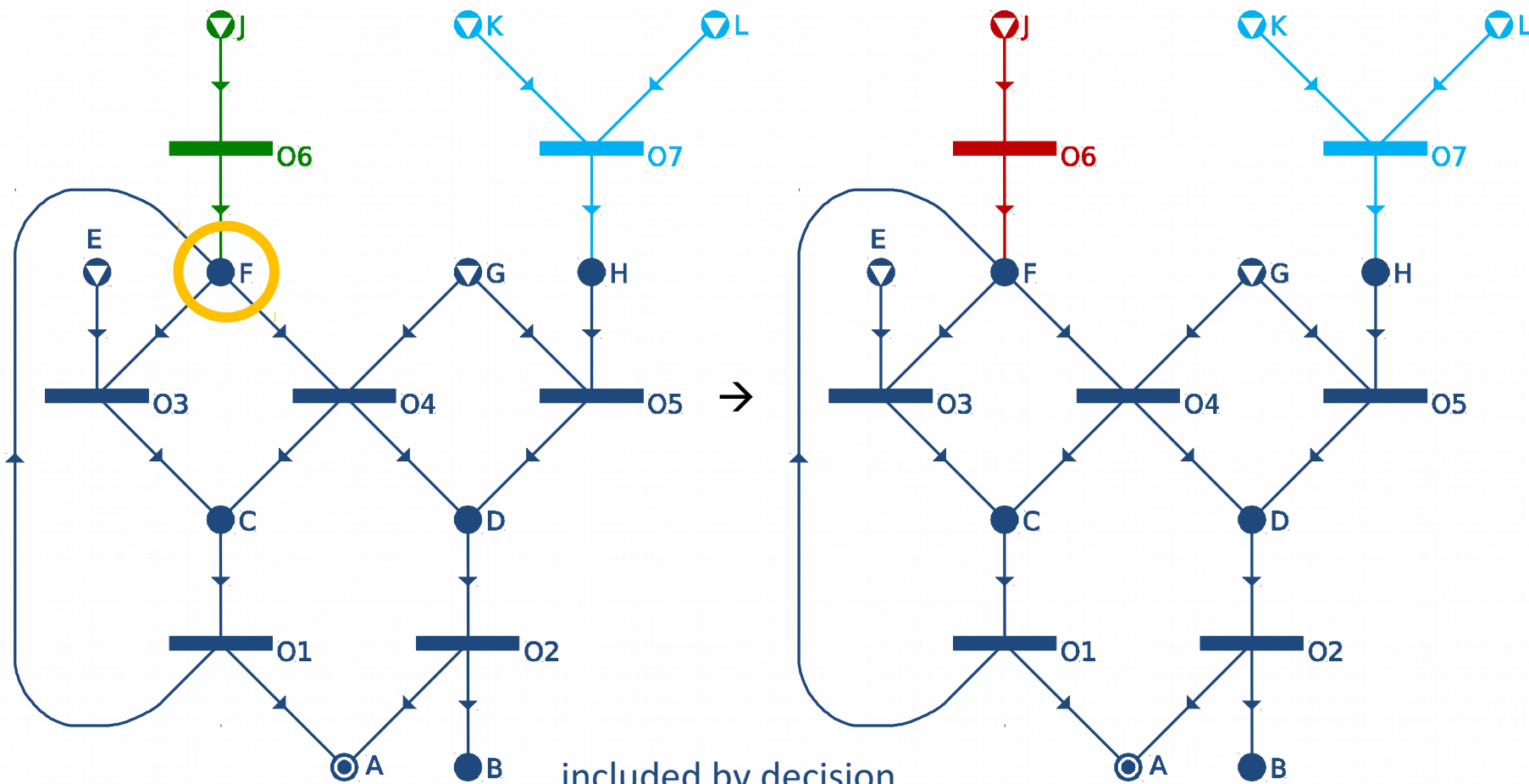
Number: Partial problem
 Letter: Decision material
 S: Solution structure



Partial problem #31 → #32 (Structure S18)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



included by decision

included by neutral extension

excluded by decision

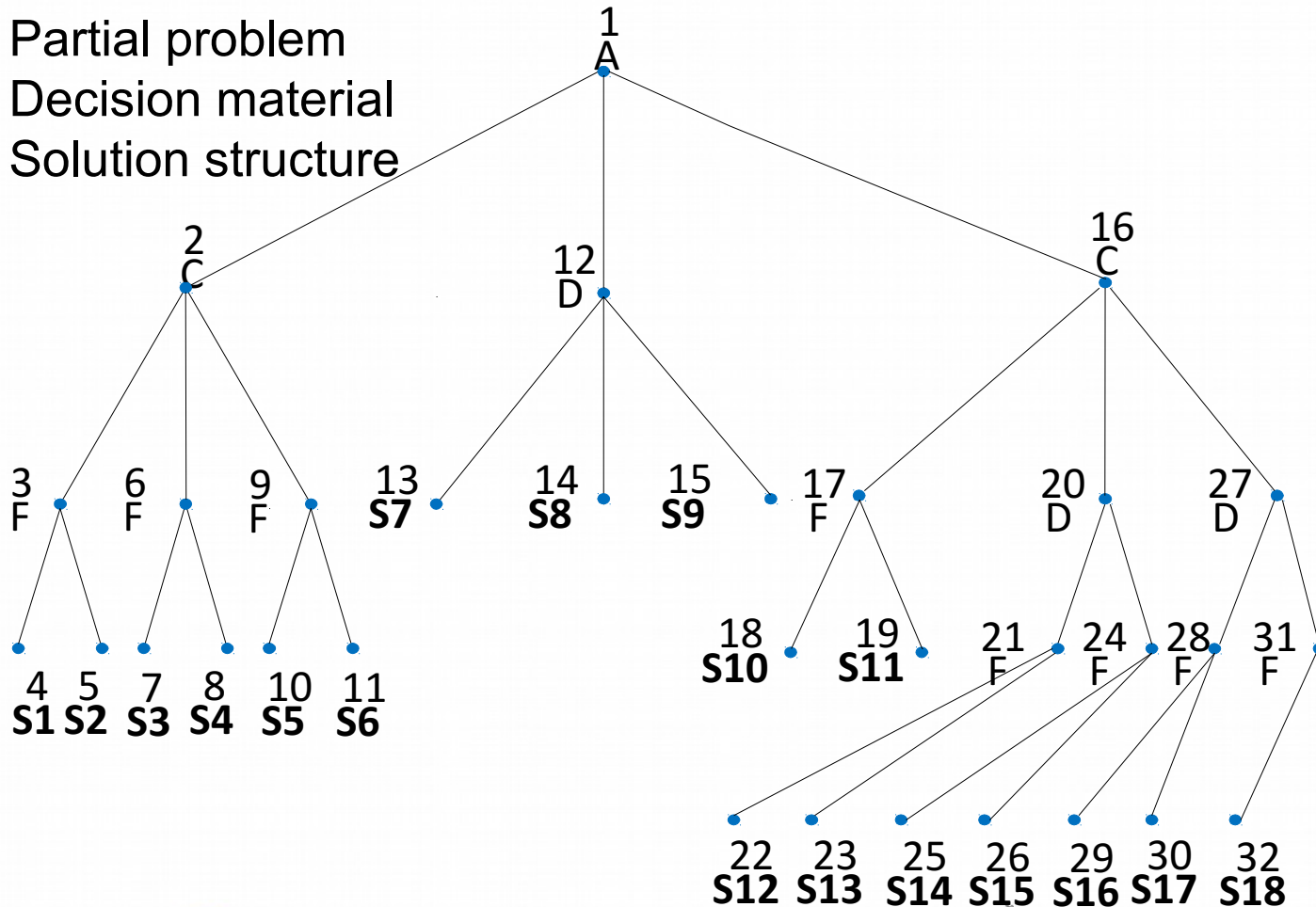
undecided



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Enumeration Tree (Worst Case)

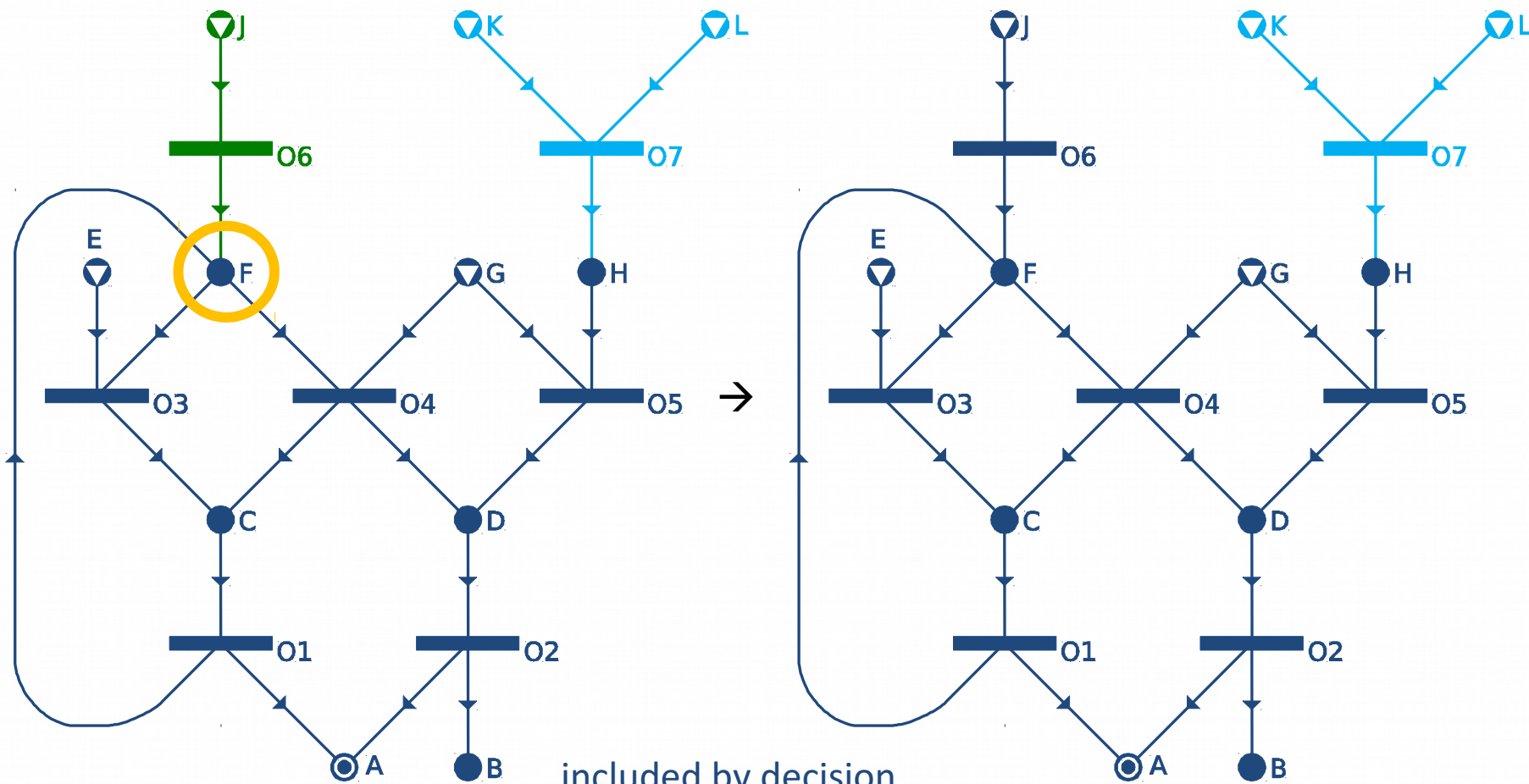
Number: Partial problem
 Letter: Decision material
 S: Solution structure



Partial problem #31 → #33 (Structure S18)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



included by decision

included by neutral extension

excluded by decision

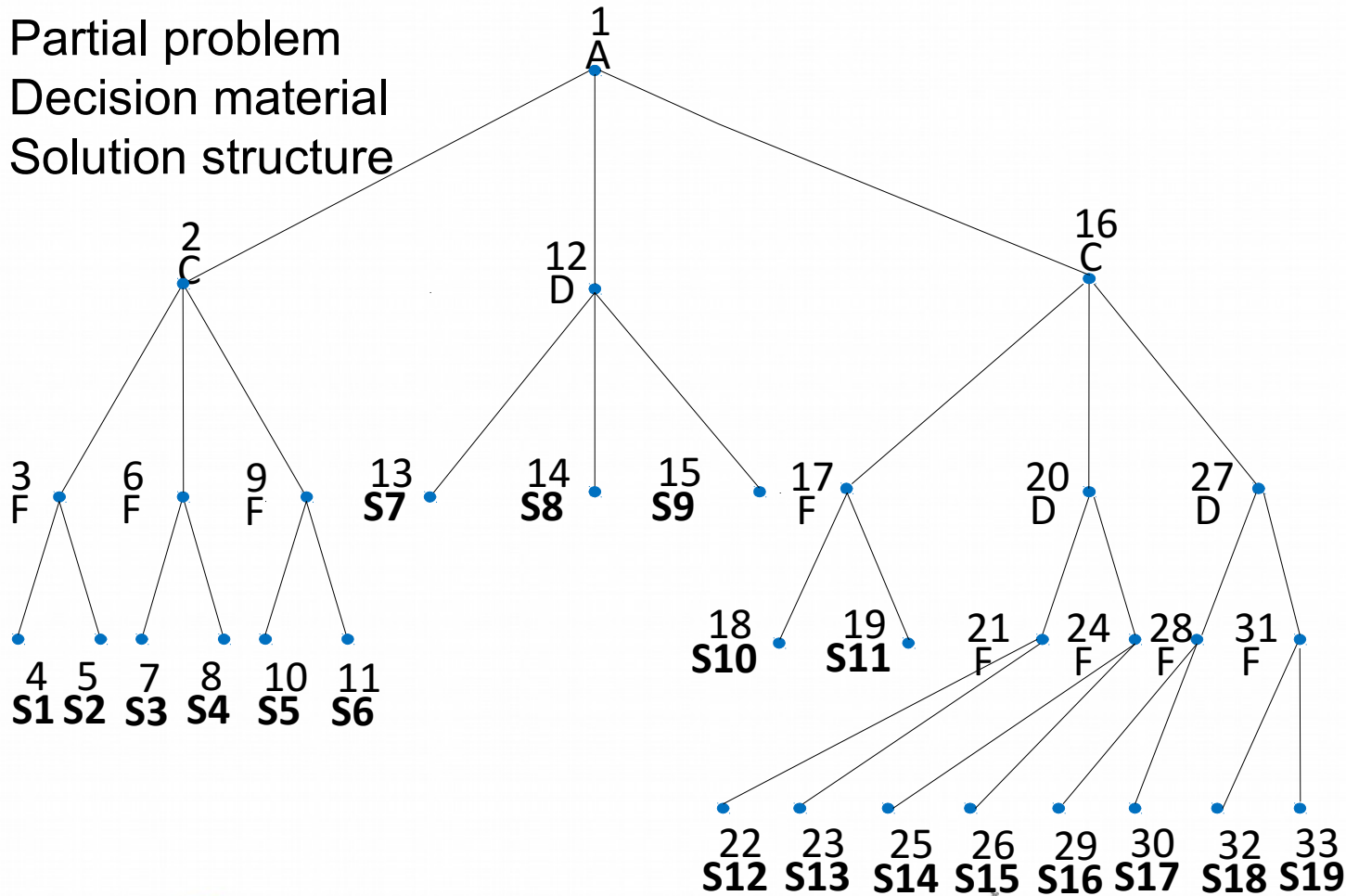
undecided



BEFECTETÉS A JÖVŐBE

Enumeration Tree (Worst Case)

Number: Partial problem
 Letter: Decision material
 S: Solution structure



B&B vs. ABB

Computational effort required by the basic and accelerated branch-and-bound algorithms in the worst case for Example PNS 2.

Number of partial problems:

Branch-and-bound algorithm: 130 million

Accelerated branch-and-bound algorithm: 8008

III.6 Process Network Synthesis: Branch & Bound

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

- Algorithm **MSG** (Maximal Structure Generation) generates the **rigorous superstructure**: the union of the combinatorially feasible structures.
- Algorithm **SSG** (Solution-Structure Generator) generates each **combinatorially feasible structure** exactly once.
- Algorithm **ABB** (Accelerated Branch and Bound) generates the ***n*-best solutions** of the problem while the search space is reduced to the set of combinatorially feasible structures.

Model Parameters

Sets of materials:

- Set of product materials: P
- Set of raw materials: R
- Lower bound on gross production:
- Upper bound on gross production:
- Upper bound on gross consumption:
- Material price: cm_j

$$Lp_j = \begin{cases} > 0, \forall m_j \in P \\ 0, otherwise \end{cases}$$

$$Up_j = \begin{cases} 0, \forall m_j \in R \\ \geq Lp_j, otherwise \end{cases}$$

$$Uc_j = \begin{cases} > 0, \forall m_j \in R \\ 0, otherwise \end{cases}$$

Model Parameters Cont'd

Set of operating units:

- Set of operating units: O
- Capacity upper bound: u_i
- Fix cost: cf_i
- Proportional cost: cp_i

Relations of materials and operating units:

- a_{ji} denotes the difference between the production and consumption rate of material m_j by operating unit o_i

PNS: Mathematical Model

(Friedler et al., 1992, 1993, 1995)

- Mass balance constraints:

$$x_1 a_{j,1} + x_2 a_{j,2} \geq x_3 a_{j,3}$$

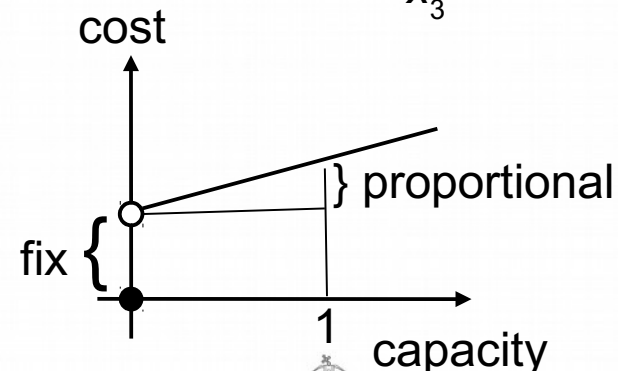
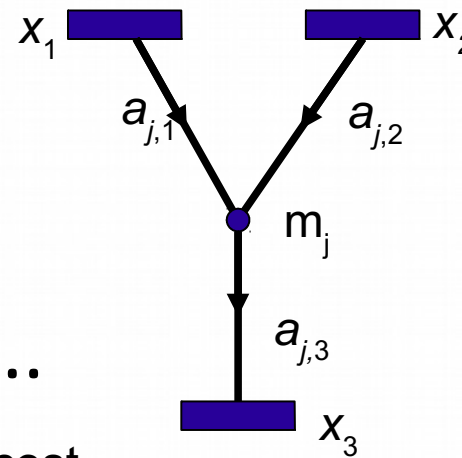
- Cost:

$$cp_1 x_1 + cf_1 y_1 + cp_2 x_2 + cf_2 y_2 \dots$$

$$y_i \in \{0,1\}$$

- In the relaxed model:

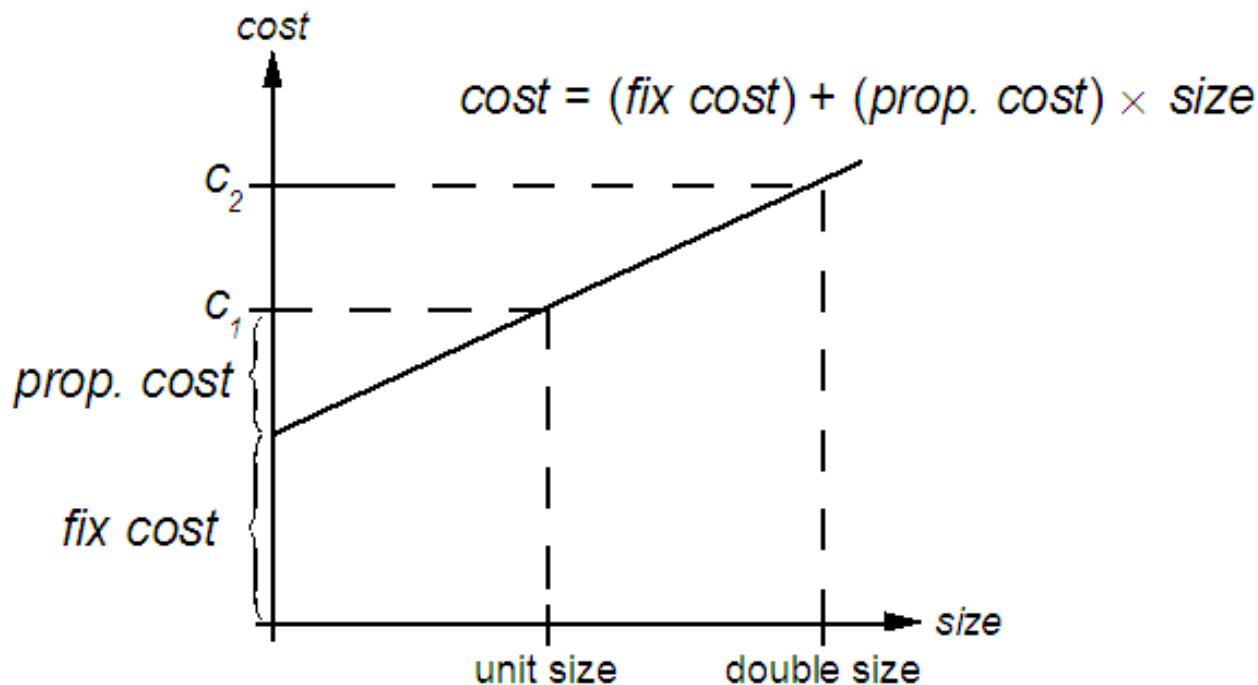
$$x_i \leq u_i y_i \text{ and } y_i \in [0,1]$$



Computer Aided Process Synthesis: Estimate Fixed and Proportional Cost

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Additional Notations Cont'd

- Set of materials involved in the optimal solution: m^*
- Set of operating units involved in the optimal solution: o^*
- Optimal solution of the problem: x^*
- Objective value of the optimal solution: z^*
- Lower bound on material balance:
$$L_j = \begin{cases} -Uc_j, \forall m_j \in R \\ Lp_j, otherwise \end{cases}$$
- Upper bound on material balance:
$$U_j = Up_j$$

Problem definition

The aim is to determine the network (m^*, o^*, x^*, z^*) which satisfies the following conditions and z^* is minimal:

$$m^* = \psi(o^*)$$

$$x^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*]^T$$

$$0 < x_i^* \leq u_i \Leftrightarrow o_i^* \in o^*$$

$$\forall x_i^* \in o^* : x_i^* \leq b_i$$

$$o_i = (\alpha, \beta) \in o^* : m_j \in \alpha \rightarrow a_{ji} < 0, m_j \in \beta \rightarrow a_{ji} > 0$$

$$\forall m_j \in m^* \cap R : -Uc_j \leq \sum_{o_i \in o^*} a_{ji} x_i \leq 0$$

$$\forall m_j \in m^* \cap P : Lp_j \leq \sum_{o_i \in o^*} a_{ji} x_i \leq Up_j$$

$$\forall m_j \in m^* \setminus R \setminus P : 0 \leq \sum_{o_i \in o^*} a_{ji} x_i \leq Up_j$$

$$z^* = \sum_{(\alpha, \beta) = o_i \in o^*} \left(cf_i + x_i^* * \left(cp_i - \sum_{m_j \in \alpha \cup \beta} a_{ji} cm_j \right) \right)$$

QSopt Linear Programming Solver

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



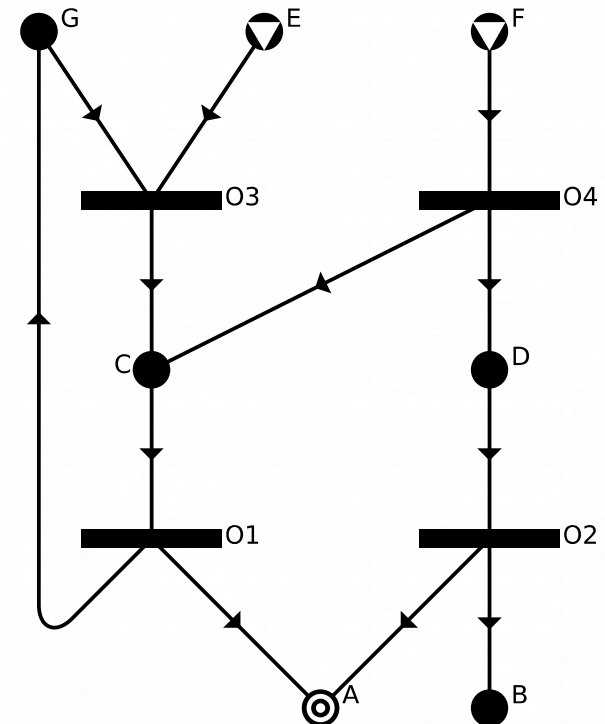
- Available :

<https://www.math.uwaterloo.ca/~bico/qsopt/>



Illustrative Example: 4 unit structure

Operating unit	Input materials	Output materials
O_1	C (5)	A (4), G (1)
O_2	D (9)	A (8), B (1)
O_3	E (4), G (1)	C (5)
O_4	F (10)	C (1), D (9)

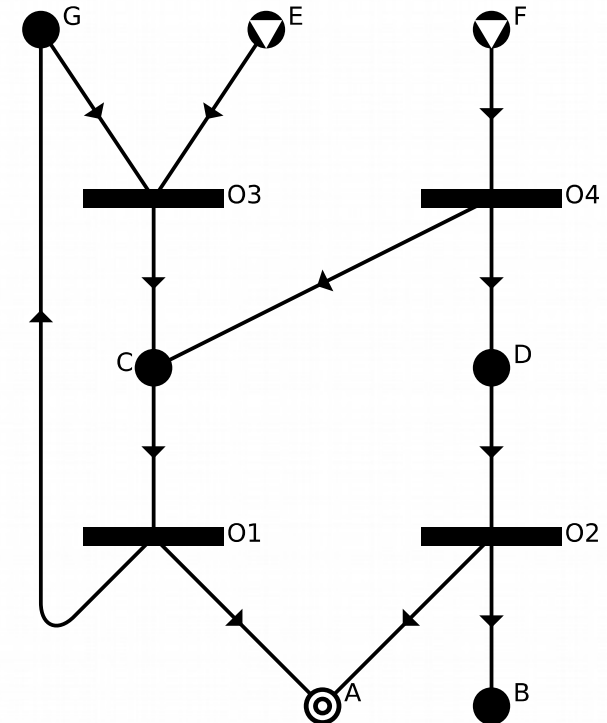


Illustrative Example: 4 unit structure (Cont'd)

Operating unit	Fixed cost (a)	Proportional cost (b)
O ₁	4	1
O ₂	3	1
O ₃	2	1
O ₄	2	0.5

Raw material	Price
E	0.8
F	1.6

Product	Constraint
A	≥ 4
Raw material E	≤ 10



Illustrative Example: Mathematical Programming Model

- Minimize the cost function:

$$S = x_1 + 4 y_1 + x_2 + 3 y_2 + 4.2 x_3 + 2 y_3 + 16.5 x_4 + 2 y_4$$

- Mass-balance constraints:

- For material C $-5x_1 + 5 x_3 + x_4 \geq 0$

- For material D $-9x_2 + 9 x_4 \geq 0$

- For material G $x_1 - x_3 \geq 0$

- Constraints on the product and raw materials:

- For product A $4 x_1 + 8 x_2 \geq 4$

- For raw material E $4 x_3 \leq 10$

- Constraint between the continuous and binary variables:

$$x_1 \leq y_1 M; x_2 \leq y_2 M; x_3 \leq y_3 M; x_4 \leq y_4 M \text{ where } M = 10$$

Search tree for the best and 2nd best solution of the hypothetical example by the conventional branch-and-bound algorithm

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Initial subproblem

$$0 \leq \{y_1, y_2, y_3, y_4\} \leq 1$$



Illustrative Example: Initial subproblem

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Minimize

$$\text{obj: } x_1 + 4 y_1 + x_2 + 3 y_2 + 4.2 x_3 + 2 y_3 + 16.5 x_4 + 2 y_4$$

Subject

$$\text{C: } -5 x_1 + 5 x_3 + x_4 \geq 0$$

$$\text{D: } -9 x_2 + 9 x_4 \geq 0$$

$$\text{G: } x_1 - x_3 \geq 0$$

$$\text{A: } 4 x_1 + 8 x_2 \geq 4$$

$$\text{E: } 4 x_3 \leq 10$$

$$\text{O1: } 10 y_1 - x_1 \geq 0$$

$$\text{O2: } 10 y_2 - x_2 \geq 0$$

$$\text{O3: } 10 y_3 - x_3 \geq 0$$

$$\text{O4: } 10 y_4 - x_4 \geq 0$$

Bounds

$$0 \leq y_1 \leq 1$$

$$0 \leq y_2 \leq 1$$

$$0 \leq y_3 \leq 1$$

$$0 \leq y_4 \leq 1$$

Objective value:

5.80000

Variable values:

$x_1 = 1.00000$

$y_1 = 0.10000$

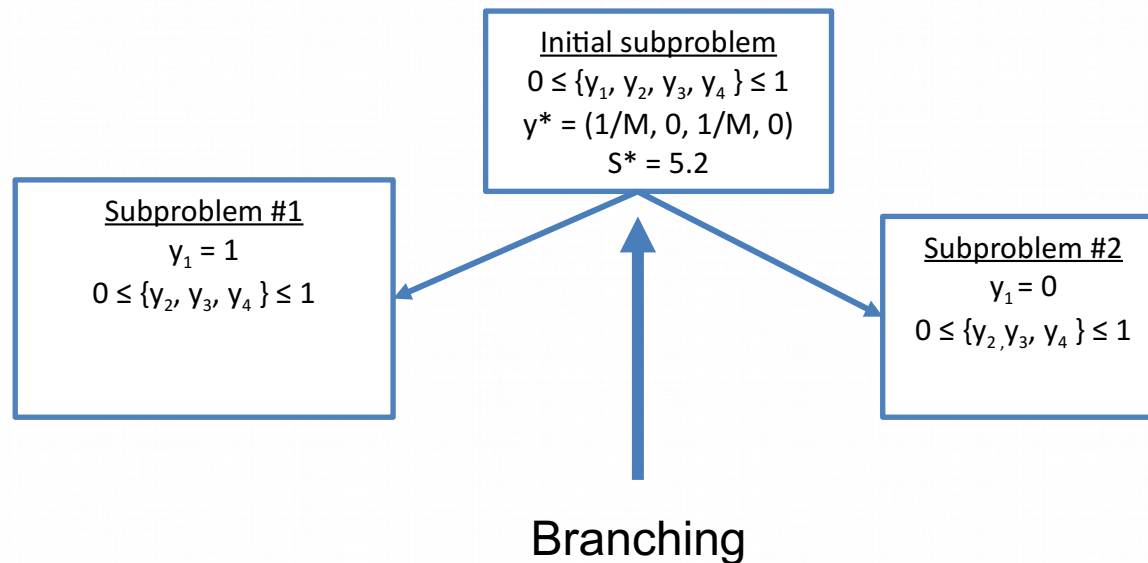
$x_3 = 1.00000$

$y_3 = 0.10000$

Search tree for the best and 2nd best solution of the hypothetical example by the conventional branch-and-bound algorithm

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Illustrative Example: Subproblem #1

($y_1=1$)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Minimize

$$\text{obj: } x_1 + 4 y_1 + x_2 + 3 y_2 + 4.2 x_3 + 2 y_3 + 16.5 x_4 + 2 y_4$$

Subject

$$\text{C: } -5 x_1 + 5 x_3 + x_4 \geq 0$$

$$\text{D: } -9 x_2 + 9 x_4 \geq 0$$

$$\text{G: } x_1 - x_3 \geq 0$$

$$\text{A: } 4 x_1 + 8 x_2 \geq 4$$

$$\text{E: } 4 x_3 \leq 10$$

$$\text{O1: } 10 y_1 - x_1 \geq 0$$

$$\text{O2: } 10 y_2 - x_2 \geq 0$$

$$\text{O3: } 10 y_3 - x_3 \geq 0$$

$$\text{O4: } 10 y_4 - x_4 \geq 0$$

Bounds

$$1 \leq y_1 \leq 1$$

$$0 \leq y_2 \leq 1$$

$$0 \leq y_3 \leq 1$$

$$0 \leq y_4 \leq 1$$

Objective value:

9.40000

Variable values:

$x_1 = 1.00000$

$y_1 = 1.00000$

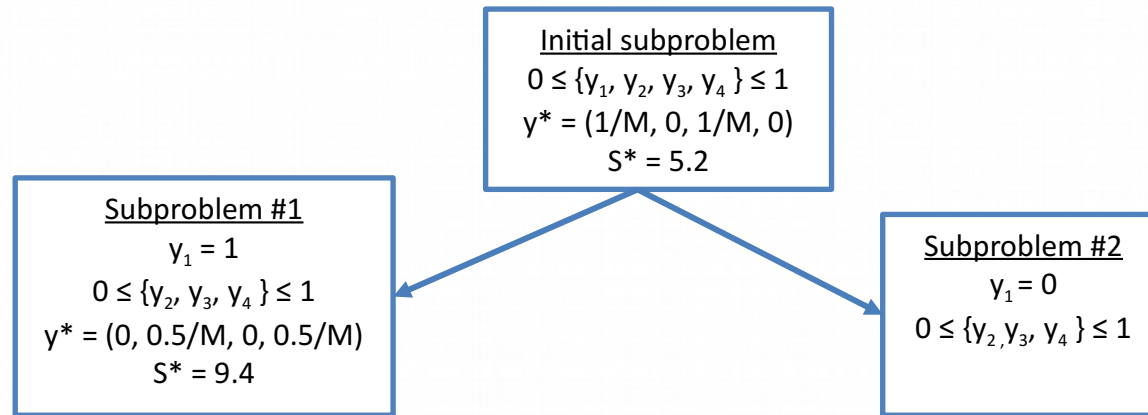
$x_3 = 1.00000$

$y_3 = 0.10000$

Search tree for the best and 2nd best solution of the hypothetical example by the conventional branch-and-bound algorithm

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Illustrative Example: Subproblem #2

($y_1=0$)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Minimize

$$\text{obj: } x_1 + 4 y_1 + x_2 + 3 y_2 + 4.2 x_3 + 2 y_3 + 16.5 x_4 + 2 y_4$$

Subject

$$\text{C: } -5 x_1 + 5 x_3 + x_4 \geq 0$$

$$\text{D: } -9 x_2 + 9 x_4 \geq 0$$

$$\text{G: } x_1 - x_3 \geq 0$$

$$\text{A: } 4 x_1 + 8 x_2 \geq 4$$

$$\text{E: } 4 x_3 \leq 10$$

$$\text{O1: } 10 y_1 - x_1 \geq 0$$

$$\text{O2: } 10 y_2 - x_2 \geq 0$$

$$\text{O3: } 10 y_3 - x_3 \geq 0$$

$$\text{O4: } 10 y_4 - x_4 \geq 0$$

Bounds

$$0 \leq y_1 \leq 0$$

$$0 \leq y_2 \leq 1$$

$$0 \leq y_3 \leq 1$$

$$0 \leq y_4 \leq 1$$

Objective value:

9.00000

Variable values:

$$x_2 = 0.50000$$

$$y_2 = 0.05000$$

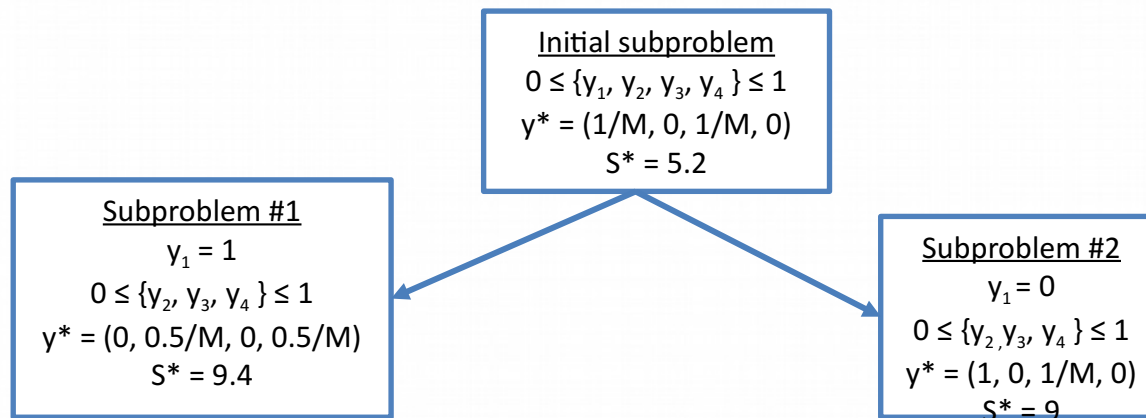
$$x_4 = 0.50000$$

$$y_4 = 0.05000$$

Search tree for the best and 2nd best solution of the hypothetical example by the conventional branch-and-bound algorithm

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

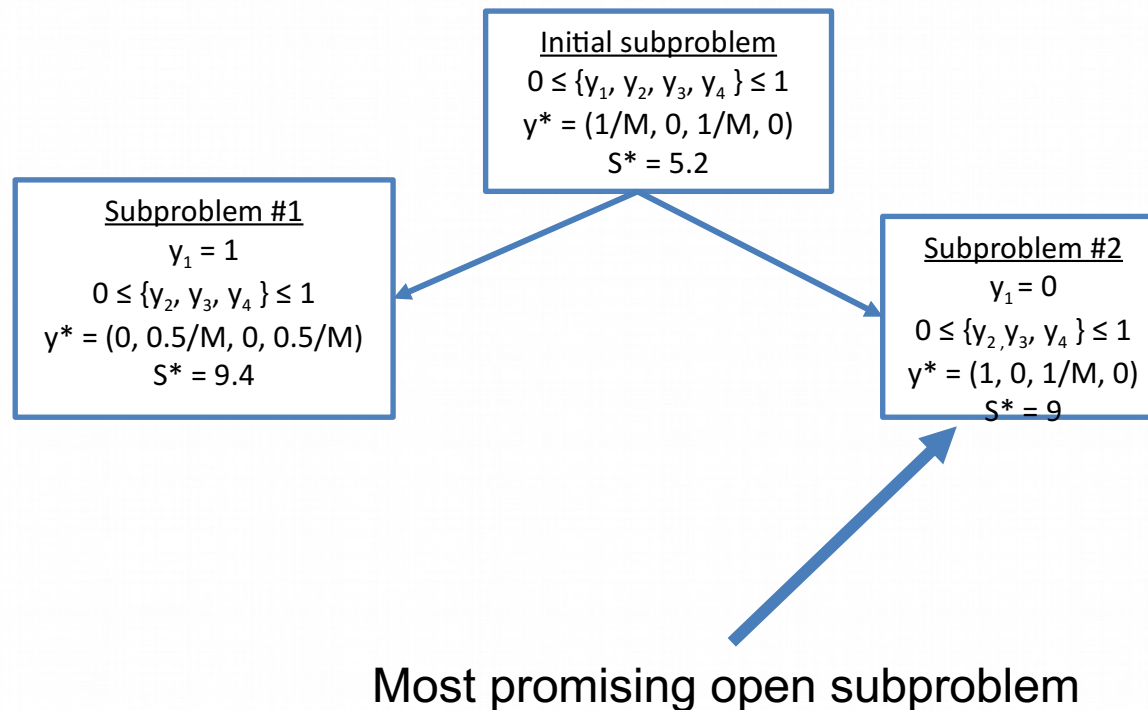
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Search tree for the best and 2nd best solution of the hypothetical example by the conventional branch-and-bound algorithm

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

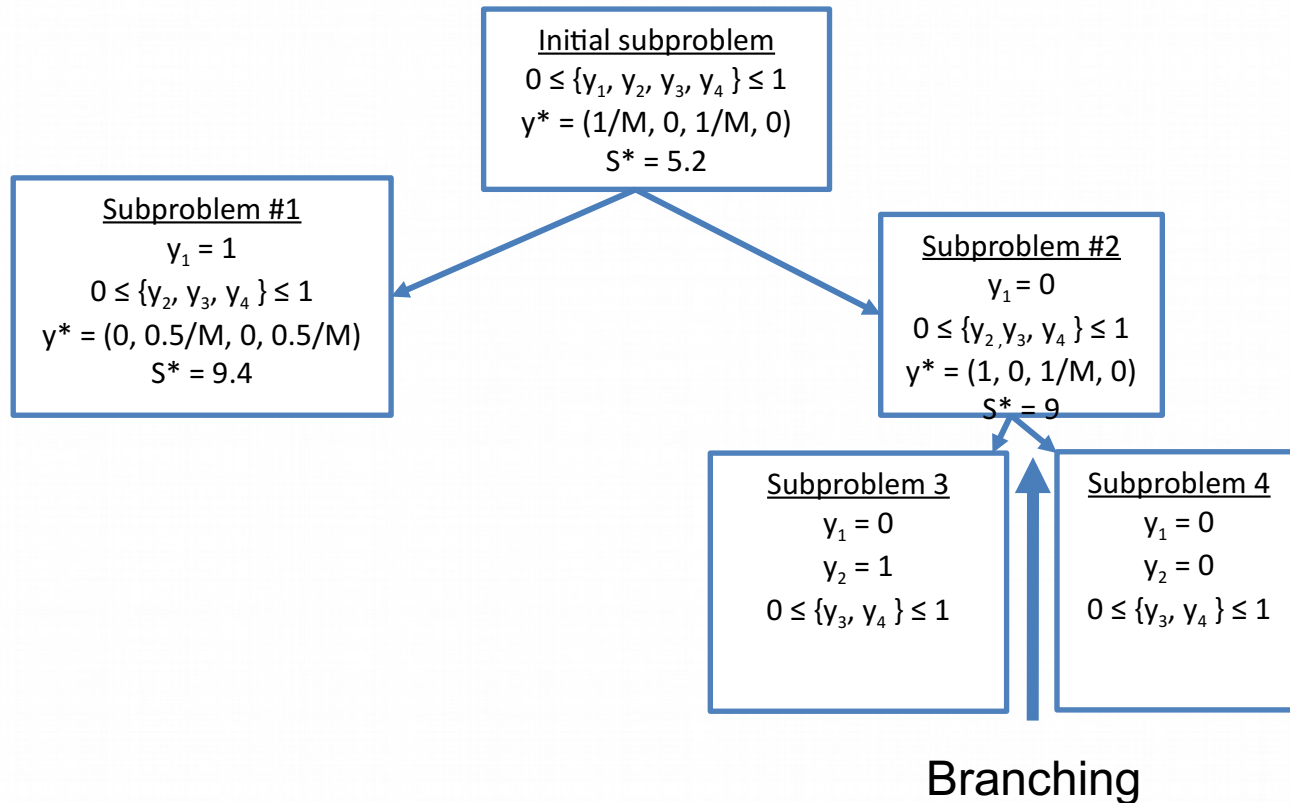
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Search tree for the best and 2nd best solution of the hypothetical example by the conventional branch-and-bound algorithm

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Illustrative Example: Subproblem #3

($y_1=0, y_2=1$)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Minimize

$$\text{obj: } x_1 + 4 y_1 + x_2 + 3 y_2 + 4.2 x_3 + 2 y_3 + 16.5 x_4 + 2 y_4$$

Subject

$$\text{C: } -5 x_1 + 5 x_3 + x_4 \geq 0$$

$$\text{D: } -9 x_2 + 9 x_4 \geq 0$$

$$\text{G: } x_1 - x_3 \geq 0$$

$$\text{A: } 4 x_1 + 8 x_2 \geq 4$$

$$\text{E: } 4 x_3 \leq 10$$

$$\text{O1: } 10 y_1 - x_1 \geq 0$$

$$\text{O2: } 10 y_2 - x_2 \geq 0$$

$$\text{O3: } 10 y_3 - x_3 \geq 0$$

$$\text{O4: } 10 y_4 - x_4 \geq 0$$

Bounds

$$0 \leq y_1 \leq 0$$

$$1 \leq y_2 \leq 1$$

$$0 \leq y_3 \leq 1$$

$$0 \leq y_4 \leq 1$$

Objective value:

11.85000

Variable values:

$$x_2 = 0.50000$$

$$y_2 = 1.00000$$

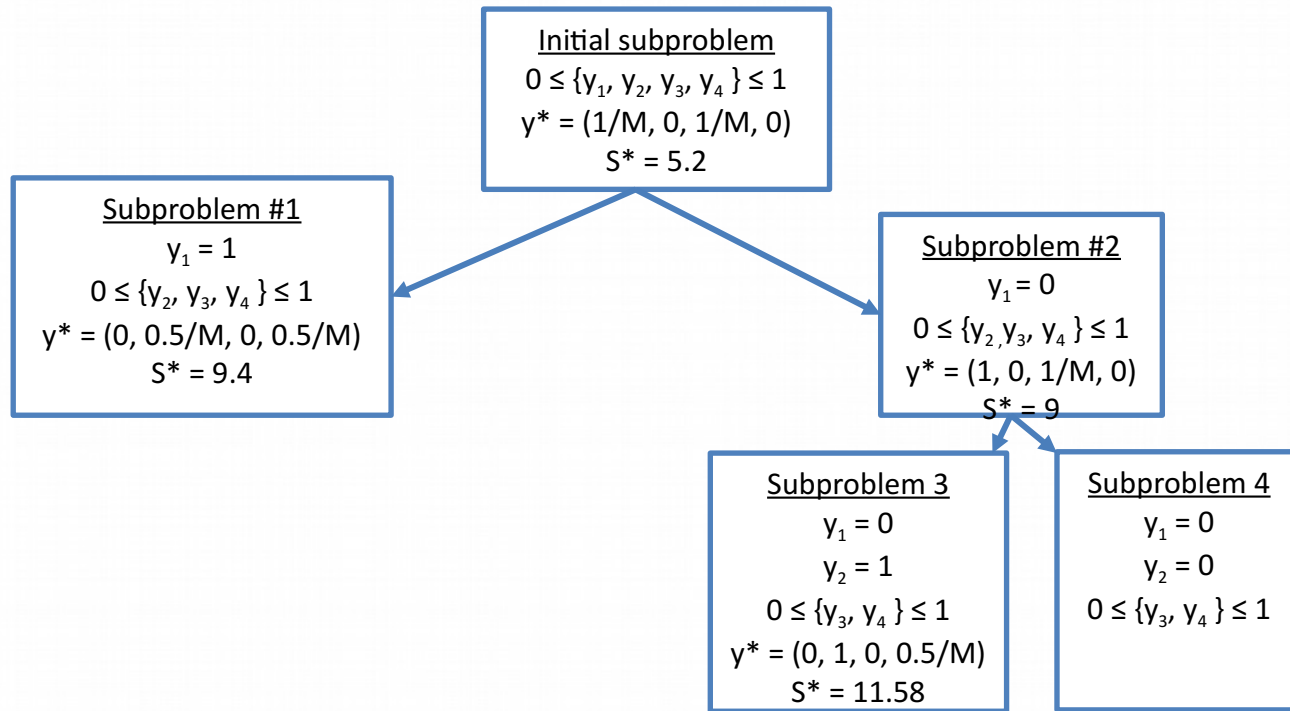
$$x_4 = 0.50000$$

$$y_4 = 0.05000$$

Search tree for the best and 2nd best solution of the hypothetical example by the conventional branch-and-bound algorithm

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Illustrative Example: Subproblem #4

($y_1=0, y_2=0$)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Minimize

$$\text{obj: } x_1 + 4 y_1 + x_2 + 3 y_2 + 4.2 x_3 + 2 y_3 + 16.5 x_4 + 2 y_4$$

Subject

$$C: -5 x_1 + 5 x_3 + x_4 \geq 0$$

$$D: -9 x_2 + 9 x_4 \geq 0$$

$$G: x_1 - x_3 \geq 0$$

$$A: 4 x_1 + 8 x_2 \geq 4$$

$$E: 4 x_3 \leq 10$$

$$O1: 10 y_1 - x_1 \geq 0$$

$$O2: 10 y_2 - x_2 \geq 0$$

$$O3: 10 y_3 - x_3 \geq 0$$

$$O4: 10 y_4 - x_4 \geq 0$$

Bounds

$$0 \leq y_1 \leq 0$$

$$0 \leq y_2 \leq 0$$

$$0 \leq y_3 \leq 1$$

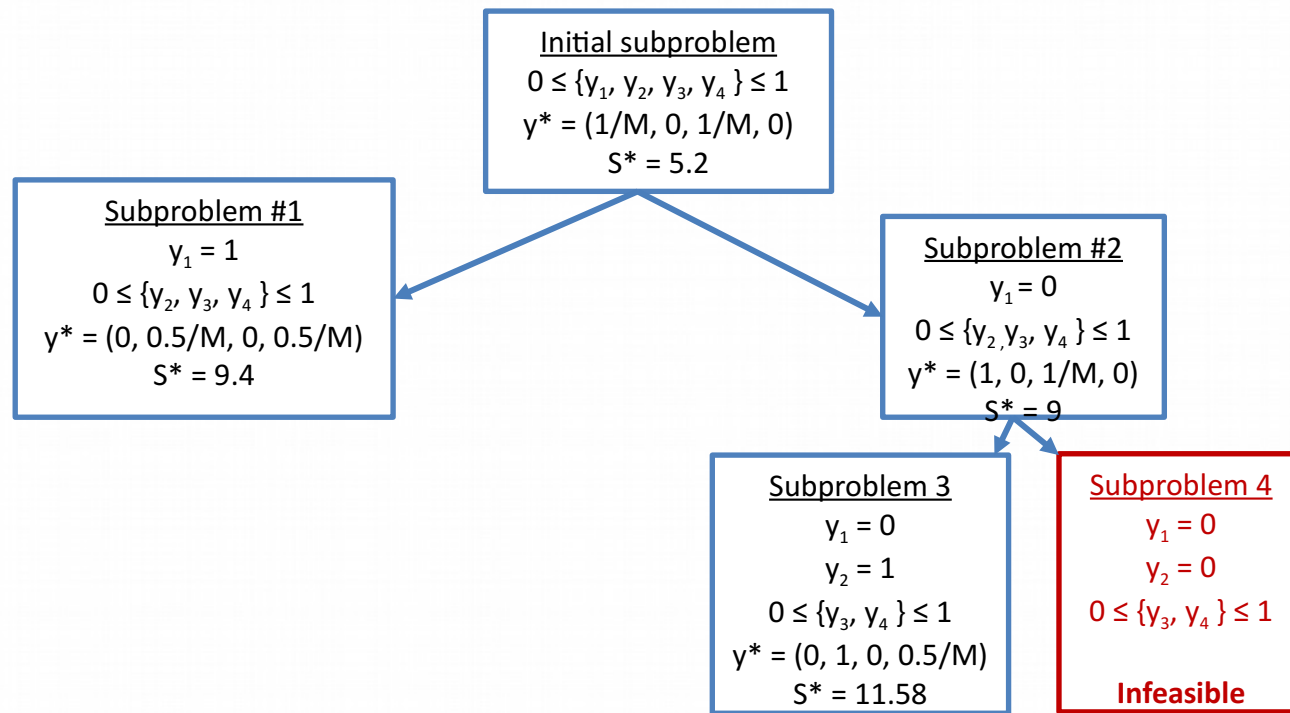
$$0 \leq y_4 \leq 1$$

Infeasible

Search tree for the best and 2nd best solution of the hypothetical example by the conventional branch-and-bound algorithm

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

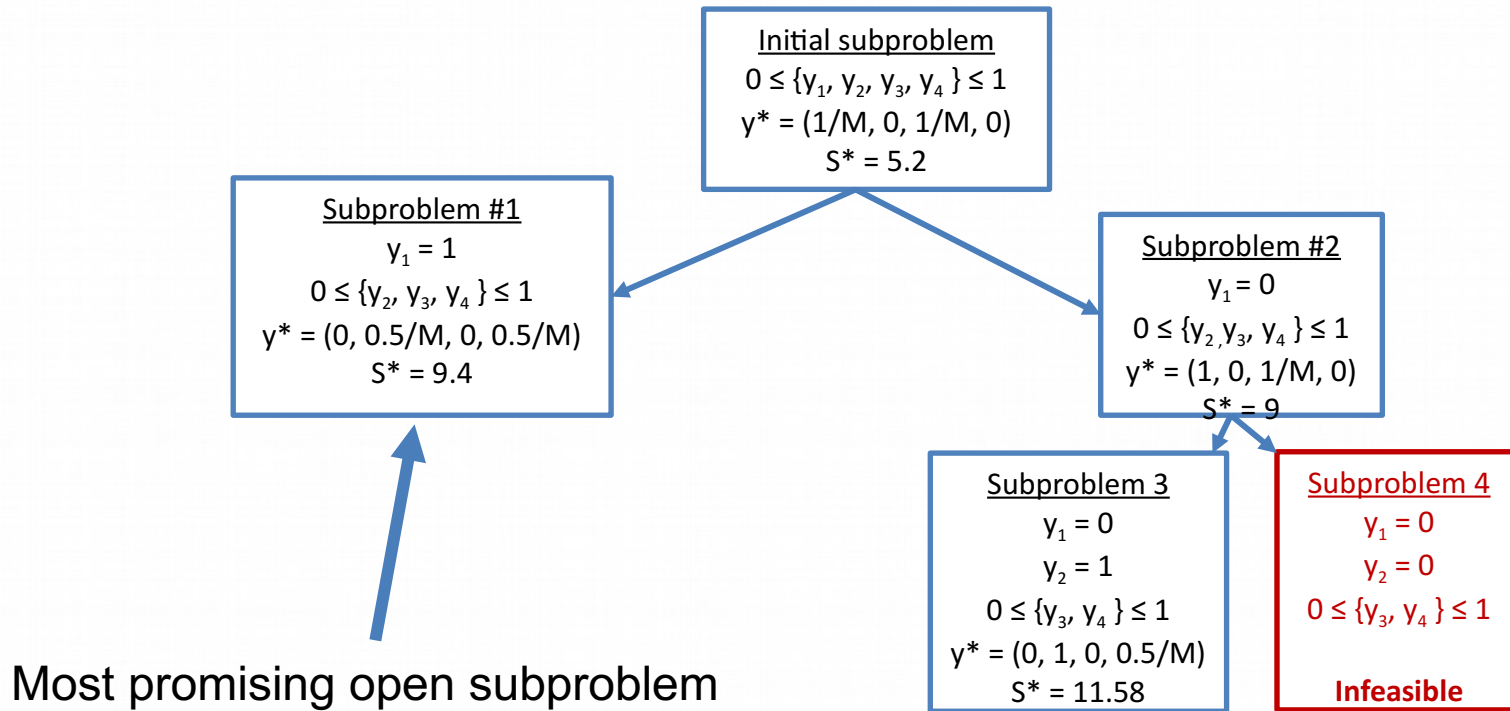
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Search tree for the best and 2nd best solution of the hypothetical example by the conventional branch-and-bound algorithm

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

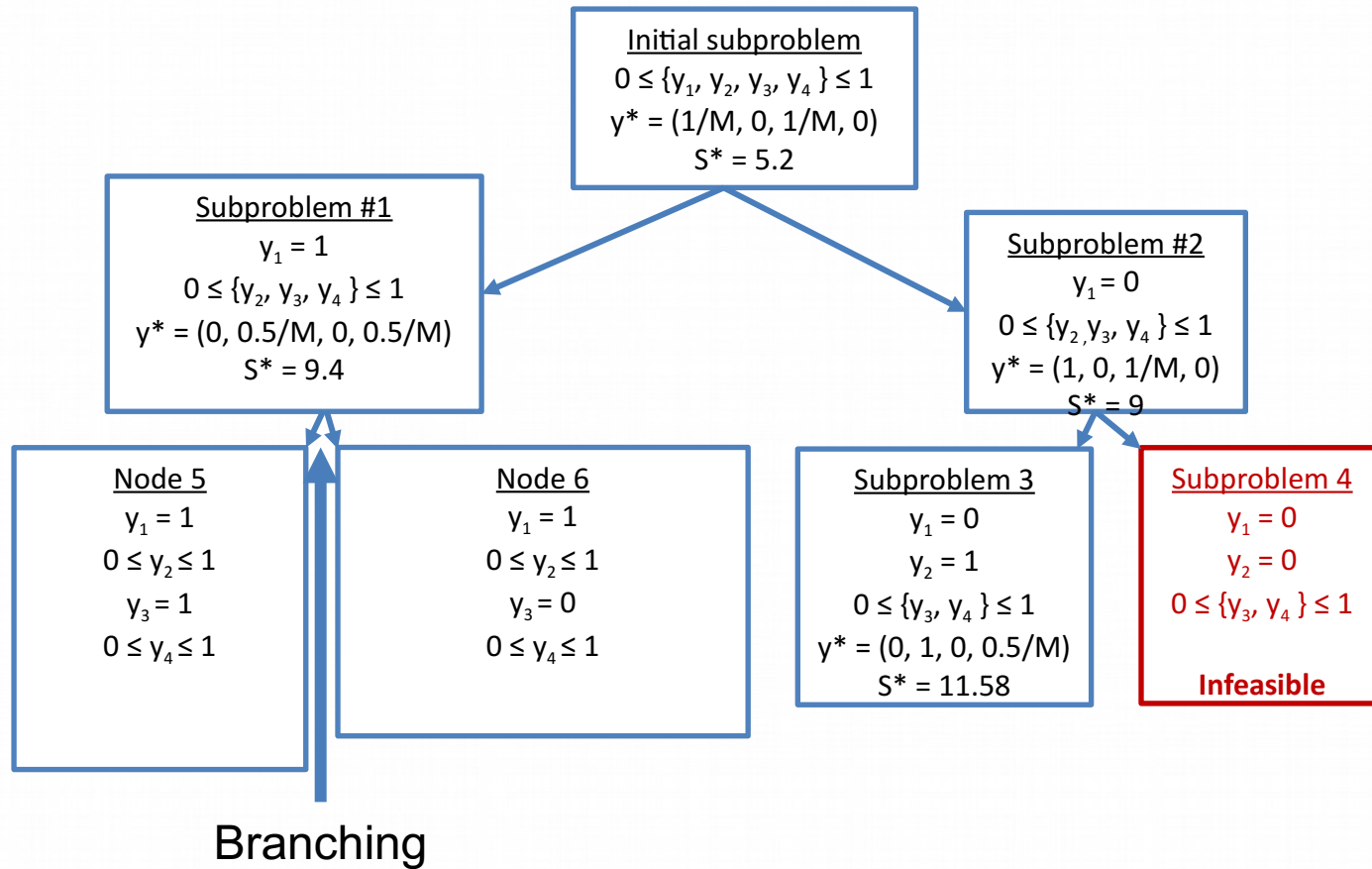
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Search tree for the best and 2nd best solution of the hypothetical example by the conventional branch-and-bound algorithm

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Illustrative Example: Subproblem #5

($y_1=1, y_3=1$)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Minimize

$$\text{obj: } x_1 + 4 y_1 + x_2 + 3 y_2 + 4.2 x_3 + 2 y_3 + 16.5 x_4 + 2 y_4$$

Subject

$$\text{C: } -5 x_1 + 5 x_3 + x_4 \geq 0$$

$$\text{D: } -9 x_2 + 9 x_4 \geq 0$$

$$\text{G: } x_1 - x_3 \geq 0$$

$$\text{A: } 4 x_1 + 8 x_2 \geq 4$$

$$\text{E: } 4 x_3 \leq 10$$

$$\text{O1: } 10 y_1 - x_1 \geq 0$$

$$\text{O2: } 10 y_2 - x_2 \geq 0$$

$$\text{O3: } 10 y_3 - x_3 \geq 0$$

$$\text{O4: } 10 y_4 - x_4 \geq 0$$

Bounds

$$1 \leq y_1 \leq 1$$

$$0 \leq y_2 \leq 1$$

$$1 \leq y_3 \leq 1$$

$$0 \leq y_4 \leq 1$$

Objective value:

11.20000

Variable values:

$x_1 = 1.00000$

$y_1 = 1.00000$

$x_3 = 1.00000$

$y_3 = 1.00000$

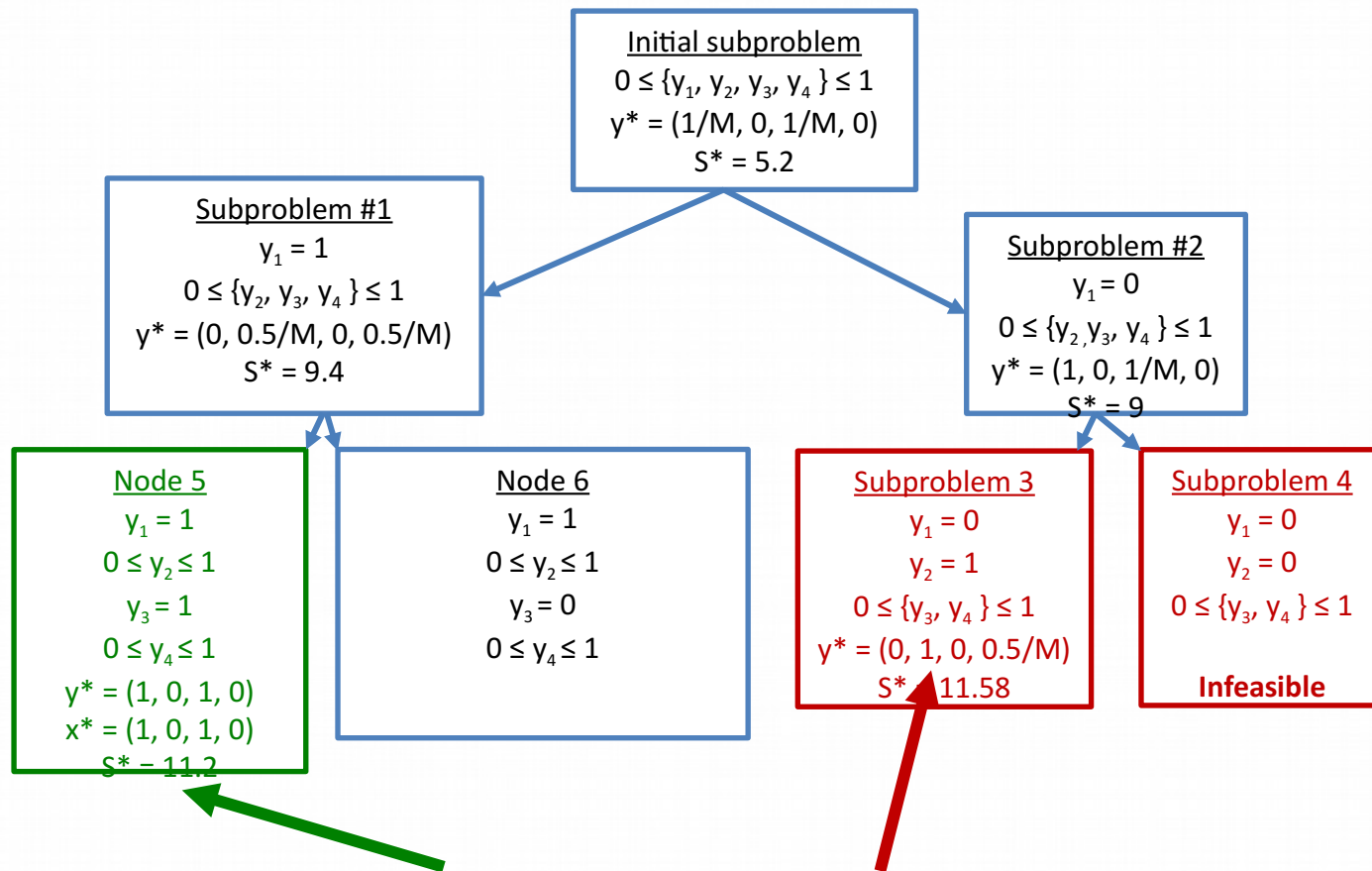
Comment: Feasible (integer values)

Optimal: Better than any open subproblem

Search tree for the best and 2nd best solution of the hypothetical example by the conventional branch-and-bound algorithm

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Current best

Bounding

Illustrative Example: Subproblem #6

($y_1=1, y_3=0$)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Minimize

$$\text{obj: } x_1 + 4 y_1 + x_2 + 3 y_2 + 4.2 x_3 + 2 y_3 + 16.5 x_4 + 2 y_4$$

Subject

$$\text{C: } -5 x_1 + 5 x_3 + x_4 \geq 0$$

$$\text{D: } -9 x_2 + 9 x_4 \geq 0$$

$$\text{G: } x_1 - x_3 \geq 0$$

$$\text{A: } 4 x_1 + 8 x_2 \geq 4$$

$$\text{E: } 4 x_3 \leq 10$$

$$\text{O1: } 10 y_1 - x_1 \geq 0$$

$$\text{O2: } 10 y_2 - x_2 \geq 0$$

$$\text{O3: } 10 y_3 - x_3 \geq 0$$

$$\text{O4: } 10 y_4 - x_4 \geq 0$$

Bounds

$$1 \leq y_1 \leq 1$$

$$0 \leq y_2 \leq 1$$

$$0 \leq y_3 \leq 0$$

$$0 \leq y_4 \leq 1$$

Objective value:

12.27273

Variable values:

$$x_1 = 0.09091$$

$$y_1 = 1.00000$$

$$x_2 = 0.45455$$

$$y_2 = 0.04545$$

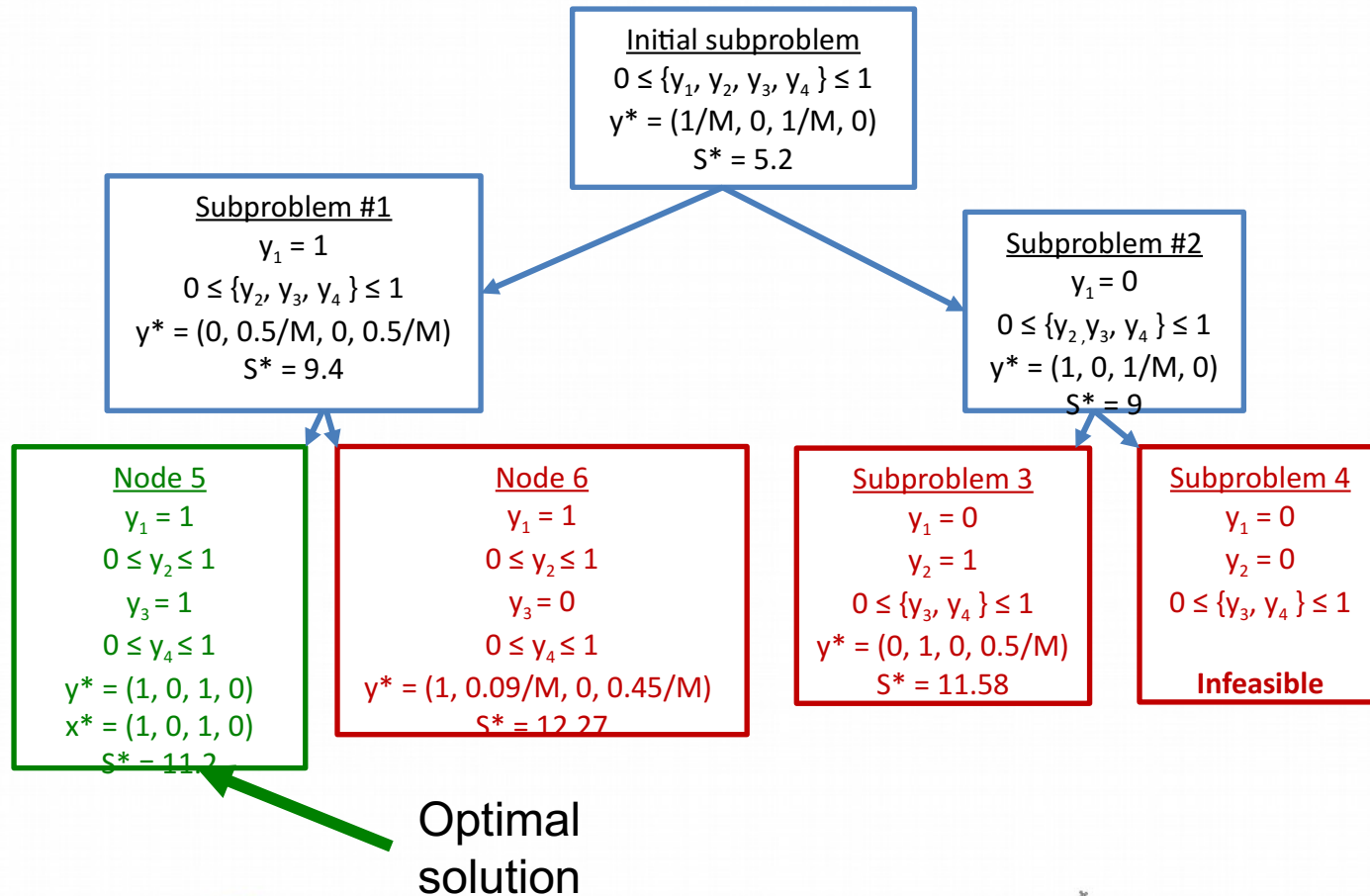
$$x_4 = 0.45455$$

$$y_4 = 0.04545$$

Search tree for the best and 2nd best solution of the hypothetical example by the conventional branch-and-bound algorithm

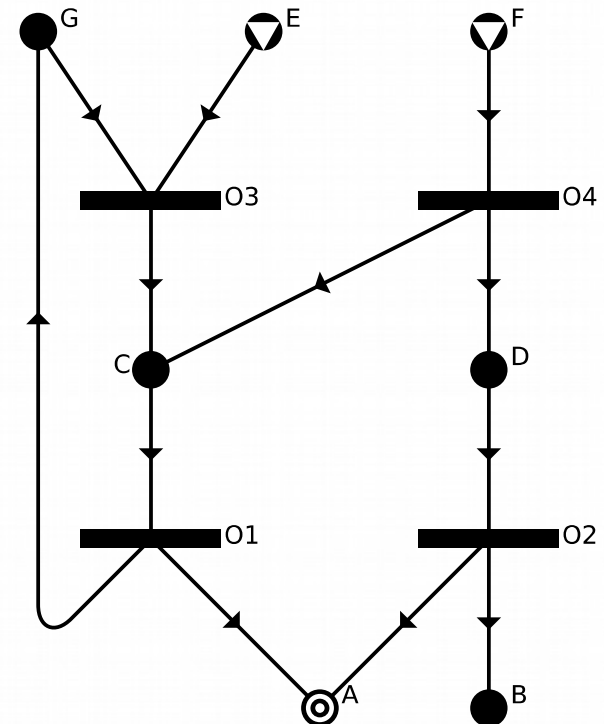
EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Illustrative Example: ABB search tree

- Subproblems generated according to algorithms SSG:
 - #1: A produced by O1
 - C produced by O3
 - C produced by O4
 - C produced by both O3 and O4
 - #2: A produced by O2
 - O4 is included by neutral extension for the production of D
 - #3: A produced by O1 and O2
 - O4 is included by neutral extension for the production of D
 - C produced by O4
 - C produced by both O3 and O4



Illustrative Example: Initial subproblem

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Minimize

$$\text{obj: } x_1 + 4 y_1 + x_2 + 3 y_2 + 4.2 x_3 + 2 y_3 + 16.5 x_4 + 2 y_4$$

Subject

$$C: -5 x_1 + 5 x_3 + x_4 \geq 0$$

$$D: -9 x_2 + 9 x_4 \geq 0$$

$$G: x_1 - x_3 \geq 0$$

$$A: 4 x_1 + 8 x_2 \geq 4$$

$$E: 4 x_3 \leq 10$$

$$O1: 10 y_1 - x_1 \geq 0$$

$$O2: 10 y_2 - x_2 \geq 0$$

$$O3: 10 y_3 - x_3 \geq 0$$

$$O4: 10 y_4 - x_4 \geq 0$$

Bounds

$$0 \leq y_1 \leq 1$$

$$0 \leq y_2 \leq 1$$

$$0 \leq y_3 \leq 1$$

$$0 \leq y_4 \leq 1$$

$p=\{A\}$: further decision is needed

Objective value:
5.80000

Variable values:

$$x_1 = 1.00000$$

$$y_1 = 0.10000$$

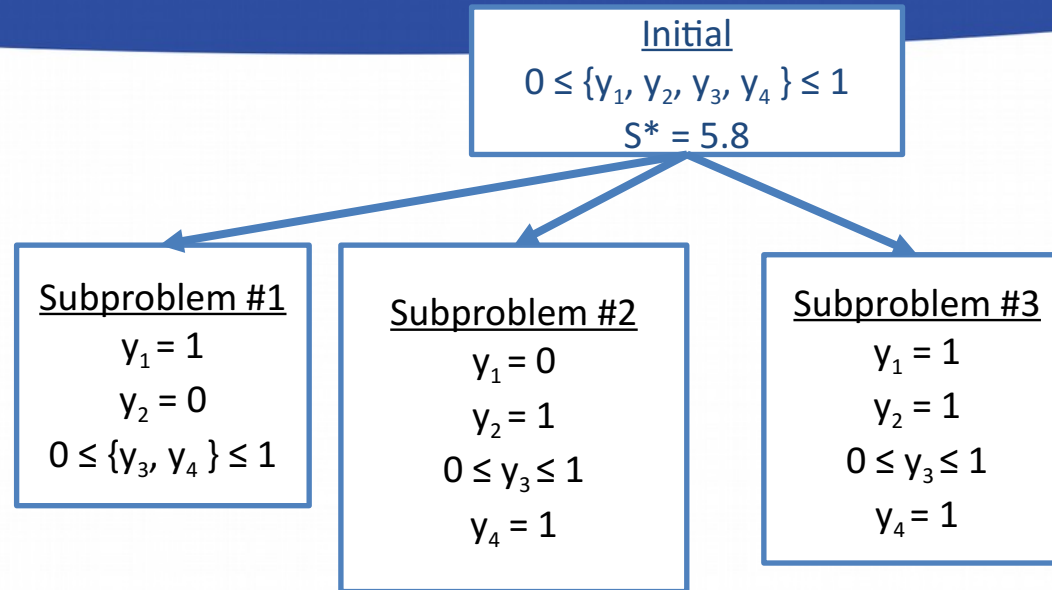
$$x_3 = 1.00000$$

$$y_3 = 0.10000$$

Search tree for the best and 2nd best solution of the hypothetical example by algorithm ABB

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Illustrative Example: Subproblem #1

($y_1=1, y_2=0$)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Minimize

$$\text{obj: } x_1 + 4 y_1 + x_2 + 3 y_2 + 4.2 x_3 + 2 y_3 + 16.5 x_4 + 2 y_4$$

Subject

$$\text{C: } -5 x_1 + 5 x_3 + x_4 \geq 0$$

$$\text{D: } -9 x_2 + 9 x_4 \geq 0$$

$$\text{G: } x_1 - x_3 \geq 0$$

$$\text{A: } 4 x_1 + 8 x_2 \geq 4$$

$$\text{E: } 4 x_3 \leq 10$$

$$\text{O1: } 10 y_1 - x_1 \geq 0$$

$$\text{O2: } 10 y_2 - x_2 \geq 0$$

$$\text{O3: } 10 y_3 - x_3 \geq 0$$

$$\text{O4: } 10 y_4 - x_4 \geq 0$$

Bounds

$$1 \leq y_1 \leq 1$$

$$0 \leq y_2 \leq 0$$

$$0 \leq y_3 \leq 1$$

$$0 \leq y_4 \leq 1$$

$p=\{C\}$: further decision is needed

Objective value:

9.40000

Variable values:

$$x_1 = 1.00000$$

$$y_1 = 1.00000$$

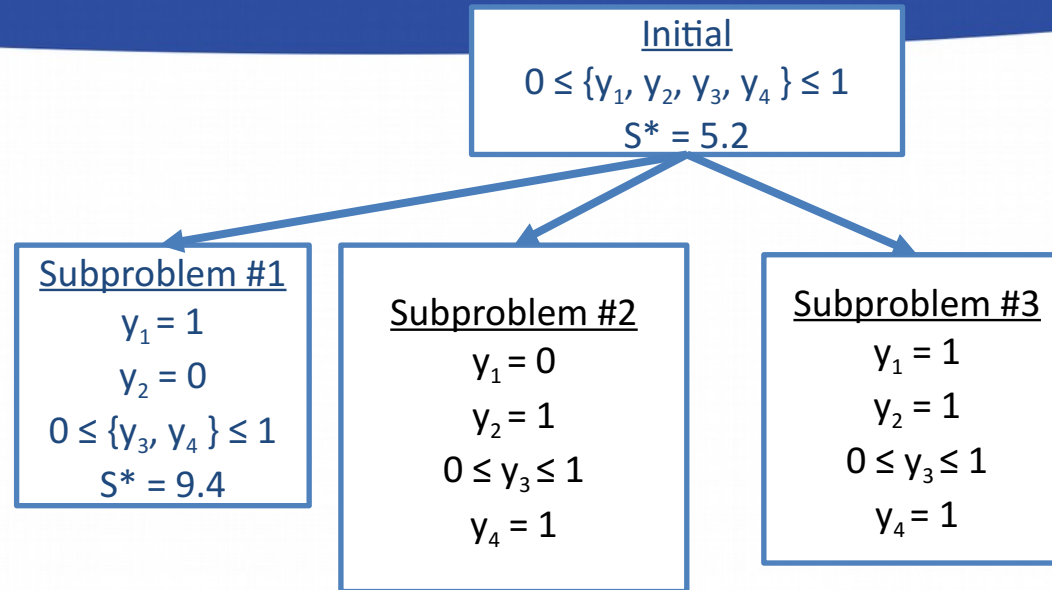
$$x_3 = 1.00000$$

$$y_3 = 0.10000$$

Search tree for the best and 2nd best solution of the hypothetical example by algorithm ABB

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Illustrative Example: Subproblem #2

($y_1=0, y_2=1, y_4=1$)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Minimize

$$\text{obj: } x_1 + 4 y_1 + x_2 + 3 y_2 + 4.2 x_3 + 2 y_3 + 16.5 x_4 + 2 y_4$$

Subject

$$\text{C: } -5 x_1 + 5 x_3 + x_4 \geq 0$$

$$\text{D: } -9 x_2 + 9 x_4 \geq 0$$

$$\text{G: } x_1 - x_3 \geq 0$$

$$\text{A: } 4 x_1 + 8 x_2 \geq 4$$

$$\text{E: } 4 x_3 \leq 10$$

$$\text{O1: } 10 y_1 - x_1 \geq 0$$

$$\text{O2: } 10 y_2 - x_2 \geq 0$$

$$\text{O3: } 10 y_3 - x_3 \geq 0$$

$$\text{O4: } 10 y_4 - x_4 \geq 0$$

Bounds

$$0 \leq y_1 \leq 0$$

$$1 \leq y_2 \leq 1$$

$$0 \leq y_3 \leq 1$$

$$1 \leq y_4 \leq 1$$

$p=\{\}$: no decision is needed

Objective value:

13.75000

Variable values:

$$x_2 = 0.50000$$

$$y_2 = 1.00000$$

$$x_4 = 0.50000$$

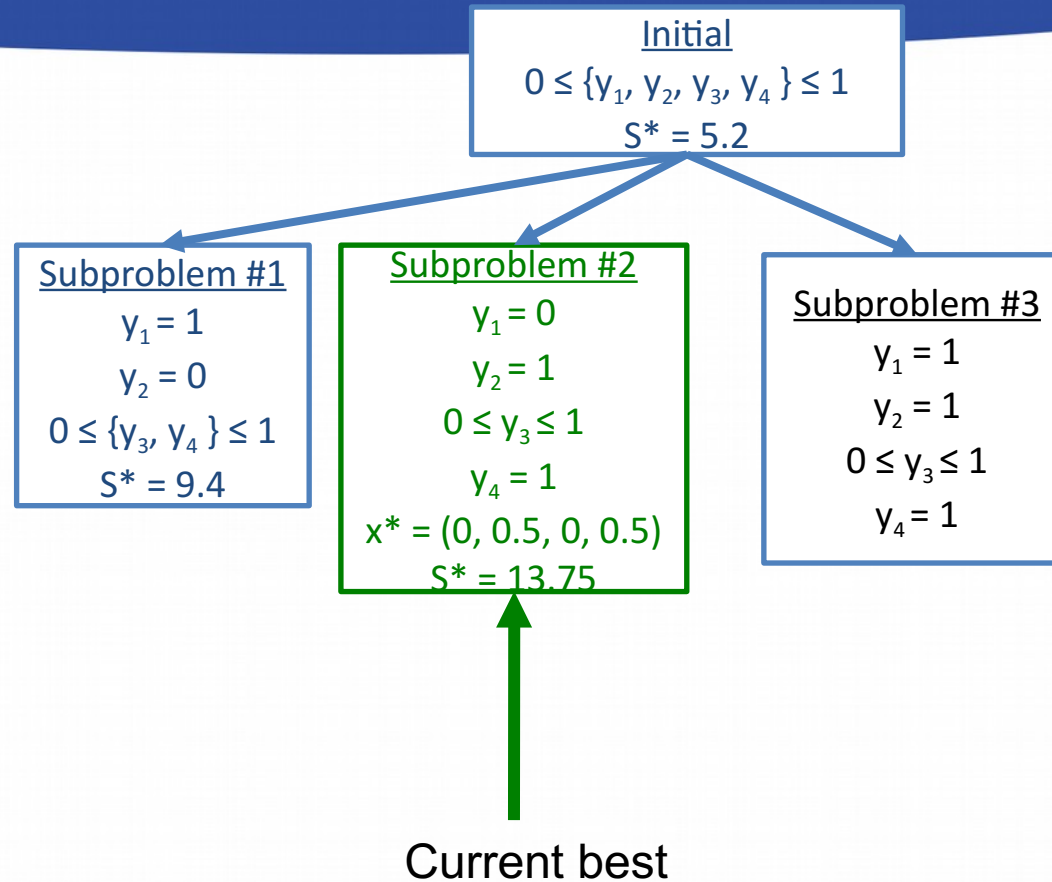
$$y_4 = 1.00000$$

Comment: Feasible solution
(Current best)

Search tree for the best and 2nd best solution of the hypothetical example by algorithm ABB

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Illustrative Example: Subproblem #3

($y_1=1, y_2=1, y_4=1$)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Minimize

$$\text{obj: } x_1 + 4 y_1 + x_2 + 3 y_2 + 4.2 x_3 + 2 y_3 + 16.5 x_4 + 2 y_4$$

Subject

$$\text{C: } -5 x_1 + 5 x_3 + x_4 \geq 0$$

$$\text{D: } -9 x_2 + 9 x_4 \geq 0$$

$$\text{G: } x_1 - x_3 \geq 0$$

$$\text{A: } 4 x_1 + 8 x_2 \geq 4$$

$$\text{E: } 4 x_3 \leq 10$$

$$\text{O1: } 10 y_1 - x_1 \geq 0$$

$$\text{O2: } 10 y_2 - x_2 \geq 0$$

$$\text{O3: } 10 y_3 - x_3 \geq 0$$

$$\text{O4: } 10 y_4 - x_4 \geq 0$$

Bounds

$$1 \leq y_1 \leq 1$$

$$1 \leq y_2 \leq 1$$

$$0 \leq y_3 \leq 1$$

$$1 \leq y_4 \leq 1$$

$p=\{C\}$: decision is needed

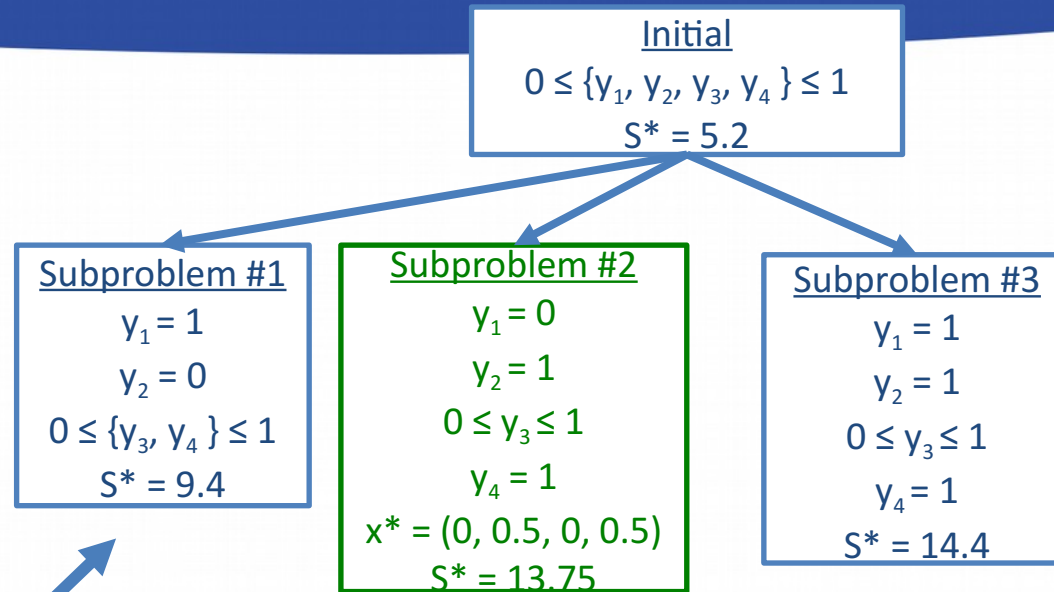
Objective value:

14.40000

Search tree for the best and 2nd best solution of the hypothetical example by algorithm ABB

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

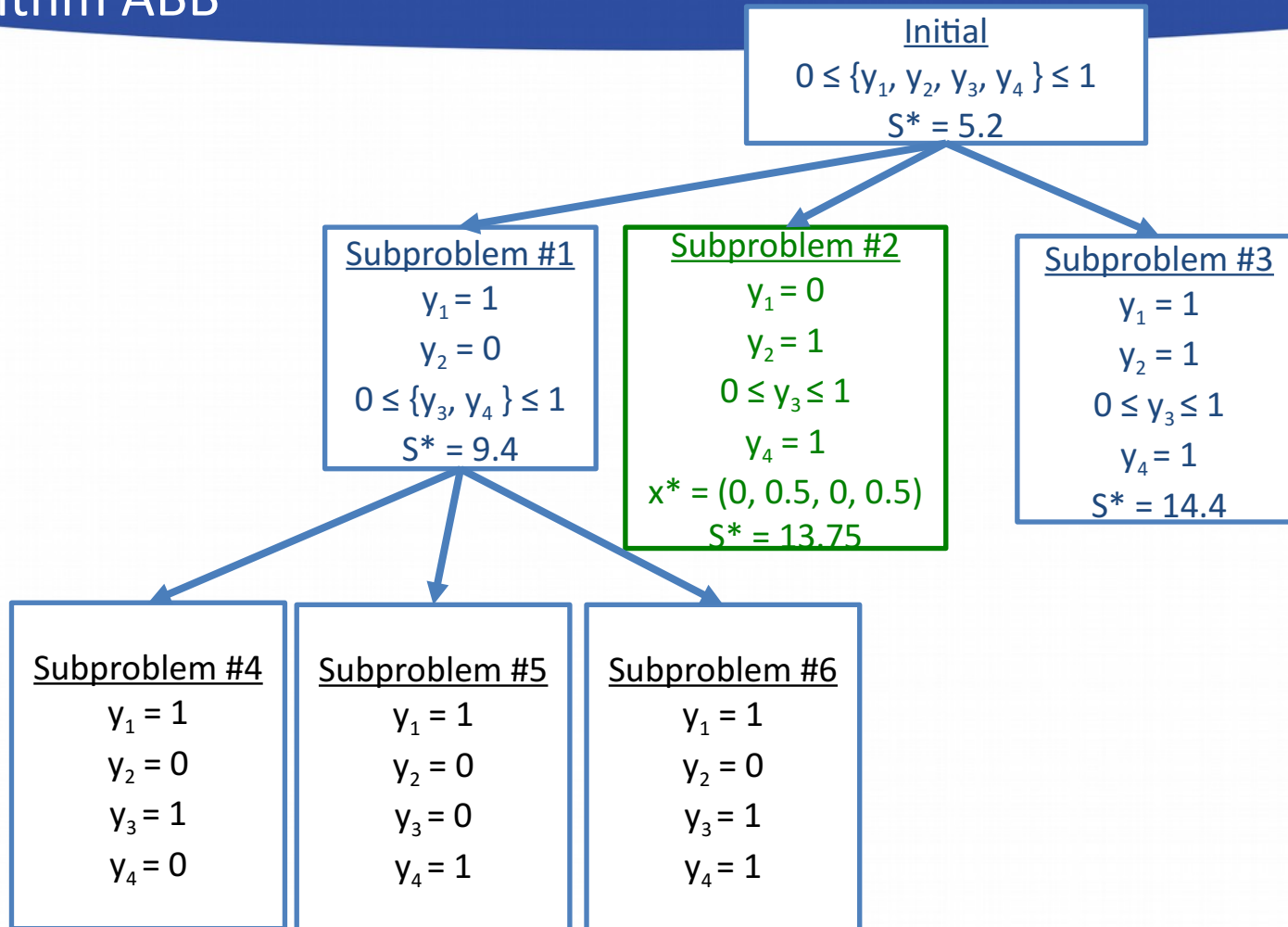


Most promising open subproblem

Search tree for the best and 2nd best solution of the hypothetical example by algorithm ABB

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Illustrative Example: Subproblem #4

($y_1=1, y_2=0, y_3=1, y_4=0$)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Minimize

obj: $x_1 + 4 y_1 + x_2 + 3 y_2 + 4.2 x_3 + 2 y_3 + 16.5 x_4 + 2 y_4$

Subject

C: $-5 x_1 + 5 x_3 + x_4 \geq 0$

D: $-9 x_2 + 9 x_4 \geq 0$

G: $x_1 - x_3 \geq 0$

A: $4 x_1 + 8 x_2 \geq 4$

E: $4 x_3 \leq 10$

O1: $10 y_1 - x_1 \geq 0$

O2: $10 y_2 - x_2 \geq 0$

O3: $10 y_3 - x_3 \geq 0$

O4: $10 y_4 - x_4 \geq 0$

Bounds

$1 \leq y_1 \leq 1$

$0 \leq y_2 \leq 0$

$1 \leq y_3 \leq 1$

$0 \leq y_4 \leq 0$

$p=\{\}$: no decision is needed

Objective value:

11.20000

Variable values:

$x_1 = 1.00000$

$y_1 = 1.00000$

$x_3 = 1.00000$

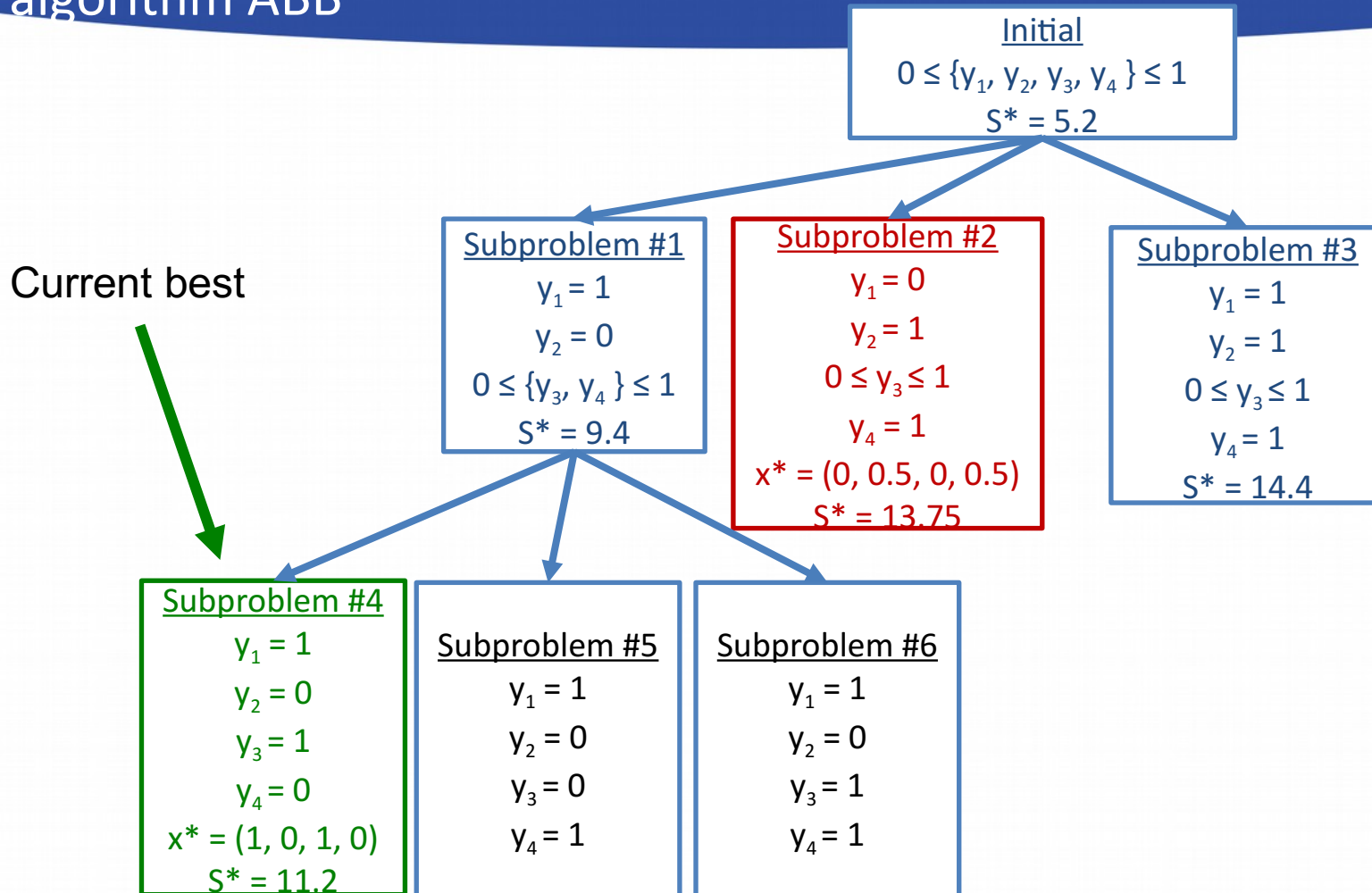
$y_3 = 1.00000$

Comment: Current best feasible solution

Search tree for the best and 2nd best solution of the hypothetical example by algorithm ABB

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Illustrative Example: Subproblem #5 ($y_1=1, y_2=0, y_3=0, y_4=1$)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Minimize

obj: $x_1 + 4 y_1 + x_2 + 3 y_2 + 4.2 x_3 + 2 y_3 + 16.5 x_4 + 2 y_4$

Subject

C: $-5 x_1 + 5 x_3 + x_4 \geq 0$

D: $-9 x_2 + 9 x_4 \geq 0$

G: $x_1 - x_3 \geq 0$

A: $4 x_1 + 8 x_2 \geq 4$

E: $4 x_3 \leq 10$

O1: $10 y_1 - x_1 \geq 0$

O2: $10 y_2 - x_2 \geq 0$

O3: $10 y_3 - x_3 \geq 0$

O4: $10 y_4 - x_4 \geq 0$

Bounds

$1 \leq y_1 \leq 1$

$0 \leq y_2 \leq 0$

$0 \leq y_3 \leq 0$

$1 \leq y_4 \leq 1$

$p=\{\}$: no decision is needed

Objective value:

89.50000

Variable values:

$x_1 = 1.00000$

$y_1 = 1.00000$

$x_4 = 5.00000$

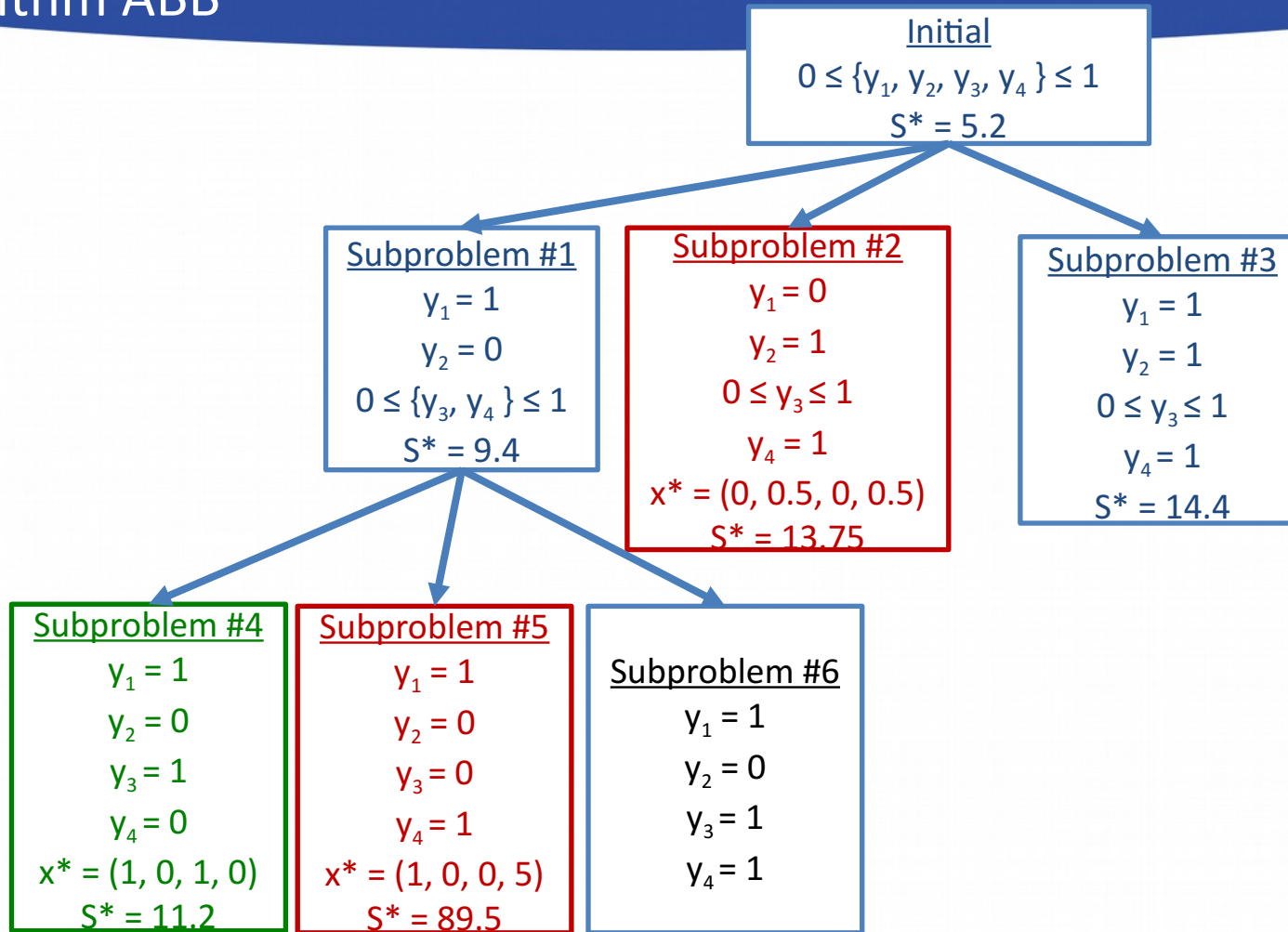
$y_4 = 1.00000$

Comment: Feasible solution

Search tree for the best and 2nd best solution of the hypothetical example by algorithm ABB

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Illustrative Example: Subproblem #6

($y_1=1, y_2=0, y_3=1, y_4=1$)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Minimize

$$\text{obj: } x_1 + 4 y_1 + x_2 + 3 y_2 + 4.2 x_3 + 2 y_3 + 16.5 x_4 + 2 y_4$$

Subject

$$\text{C: } -5 x_1 + 5 x_3 + x_4 \geq 0$$

$$\text{D: } -9 x_2 + 9 x_4 \geq 0$$

$$\text{G: } x_1 - x_3 \geq 0$$

$$\text{A: } 4 x_1 + 8 x_2 \geq 4$$

$$\text{E: } 4 x_3 \leq 10$$

$$\text{O1: } 10 y_1 - x_1 \geq 0$$

$$\text{O2: } 10 y_2 - x_2 \geq 0$$

$$\text{O3: } 10 y_3 - x_3 \geq 0$$

$$\text{O4: } 10 y_4 - x_4 \geq 0$$

Bounds

$$1 \leq y_1 \leq 1$$

$$0 \leq y_2 \leq 0$$

$$1 \leq y_3 \leq 1$$

$$1 \leq y_4 \leq 1$$

$p=\{\}$: no decision is needed

Objective value:

13.20000

Variable values:

$$x_1 = 1.00000$$

$$y_1 = 1.00000$$

$$x_3 = 1.00000$$

$$y_3 = 1.00000$$

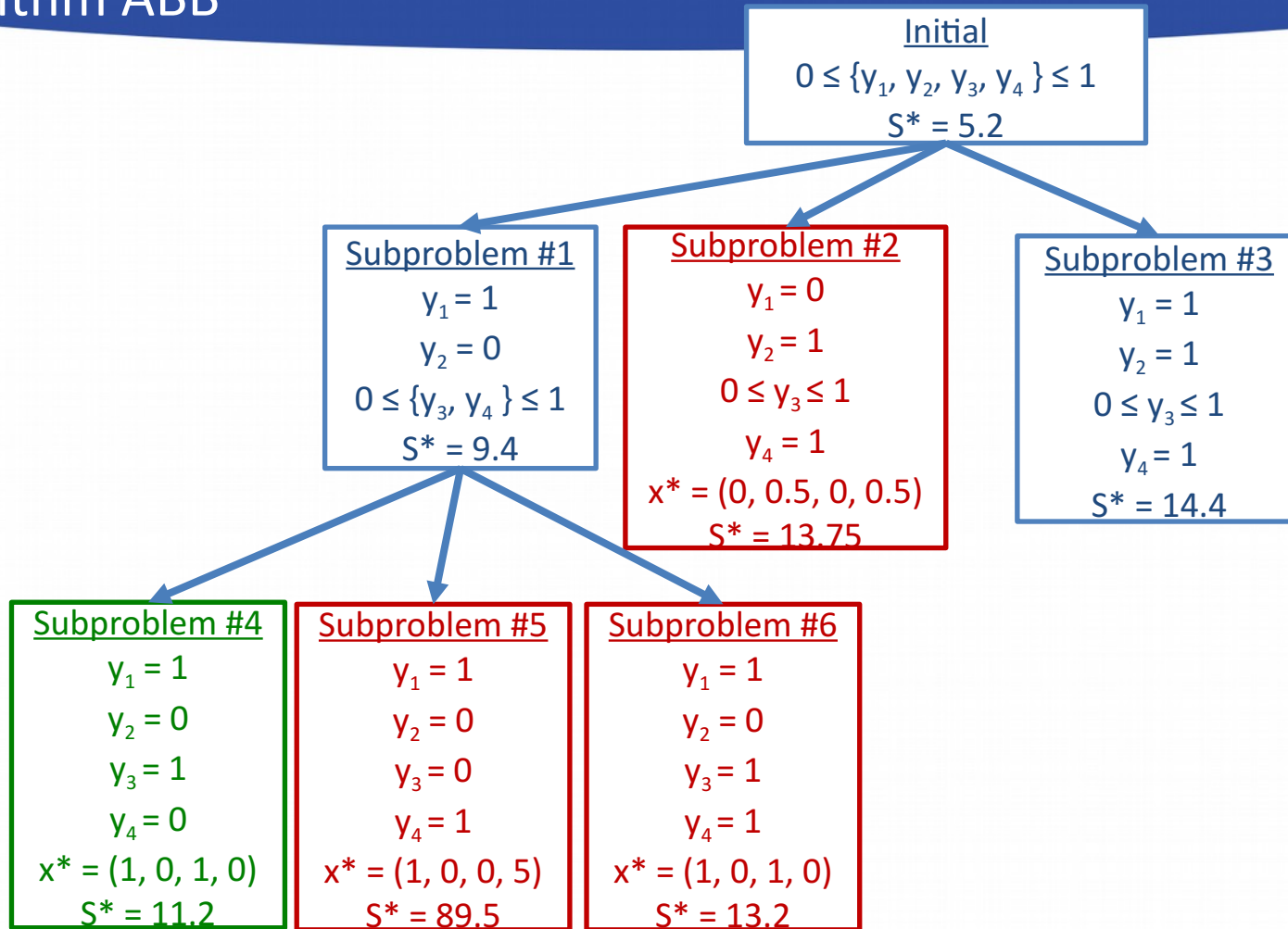
$$y_4 = 1.00000$$

Comment: Feasible solution

Search tree for the best and 2nd best solution of the hypothetical example by algorithm ABB

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

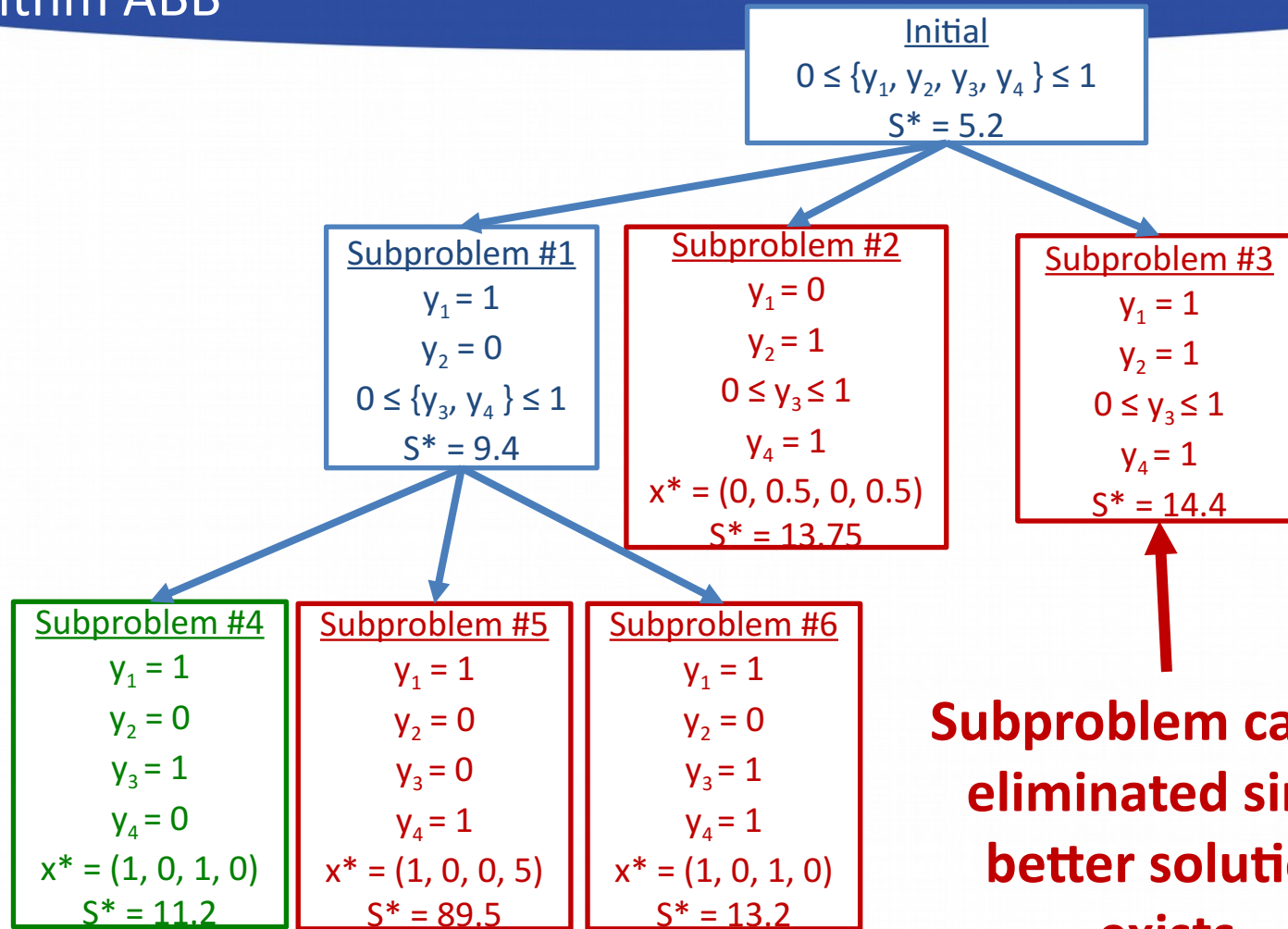
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Search tree for the best and 2nd best solution of the hypothetical example by algorithm ABB

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

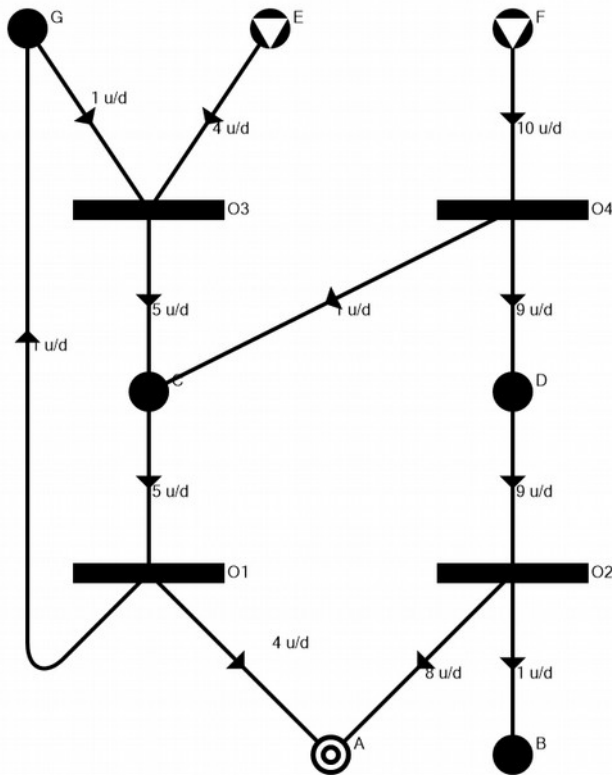


Subproblem can be eliminated since better solution exists

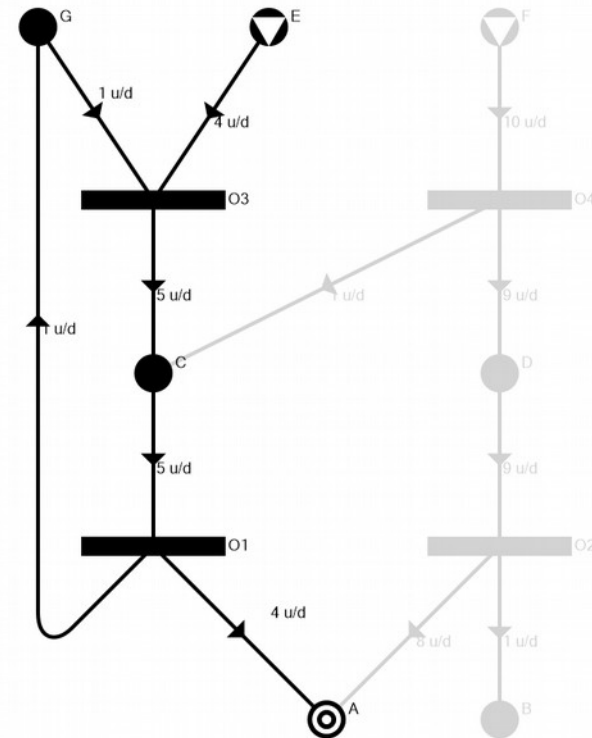


Optimal structure

Maximal structure



Optimal structure: 11.2



IV. Case study: Conceptual design of reaction and process network for VCM production by P-graph Studio

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Outline

- Vinyl-Chloride Monomer (VCM) Production: Introduction
- P-graph Studio 4.0 Capabilities
- P-graph Studio 4.0 Installation
- Reaction-Network Synthesis for VCM Production by P-graph Studio
- Computer Aided Process-Network Synthesis
- Process-Network Synthesis for VCM Production by P-graph Studio

Vinyl-Chloride Monomer (VCM)

Production: Introduction

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- Vinyl chloride is a major chemical, which essentially serves as the monomer for making polyvinyl chloride (PVC).
- There are several patented processes for the manufacture of vinyl chloride in the U.S. and other countries.
- Some 23 million metric tons were produced worldwide in 1997, about 26 percent of which was produced in the U.S.
- The average U.S. plant capacity is about 500,000 metric tons (5×10^8 kg) per year.
- Vinyl chloride monomer and nearly all of the materials used and coproduced in its production are flammable and toxic. This requires strict limitations on emissions from such plants and on the concentrations within the plant working areas.



More Information on Flowsheet Synthesis Synthesis for VCM Production

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és
hozzáférhetőségének együttes javítása
a Pannon Egyetemen

- Flowsheet Synthesis and
Development of
**Plant Design and Economics for
Chemical Engineers**
Fifth Edition
Peters, Timmerhaus, and West
Published by McGraw-Hill

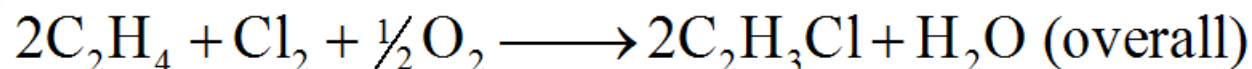
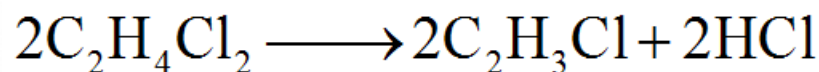
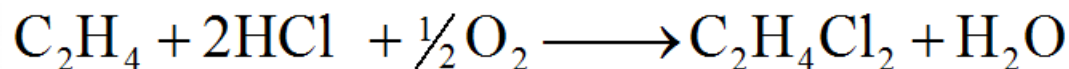
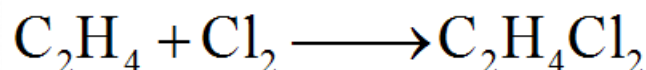


Potential Reaction Pathways to vinyl chloride from organic raw materials

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

1. Acetylene hydrochlorination
2. Ethylene direct chlorination
3. Ethylene chlorination plus 1,2 dichloroethane pyrolysis
4. Oxychlorination plus 1,2 dichloroethane pyrolysis
5. Chlorination plus oxychlorination plus pyrolysis



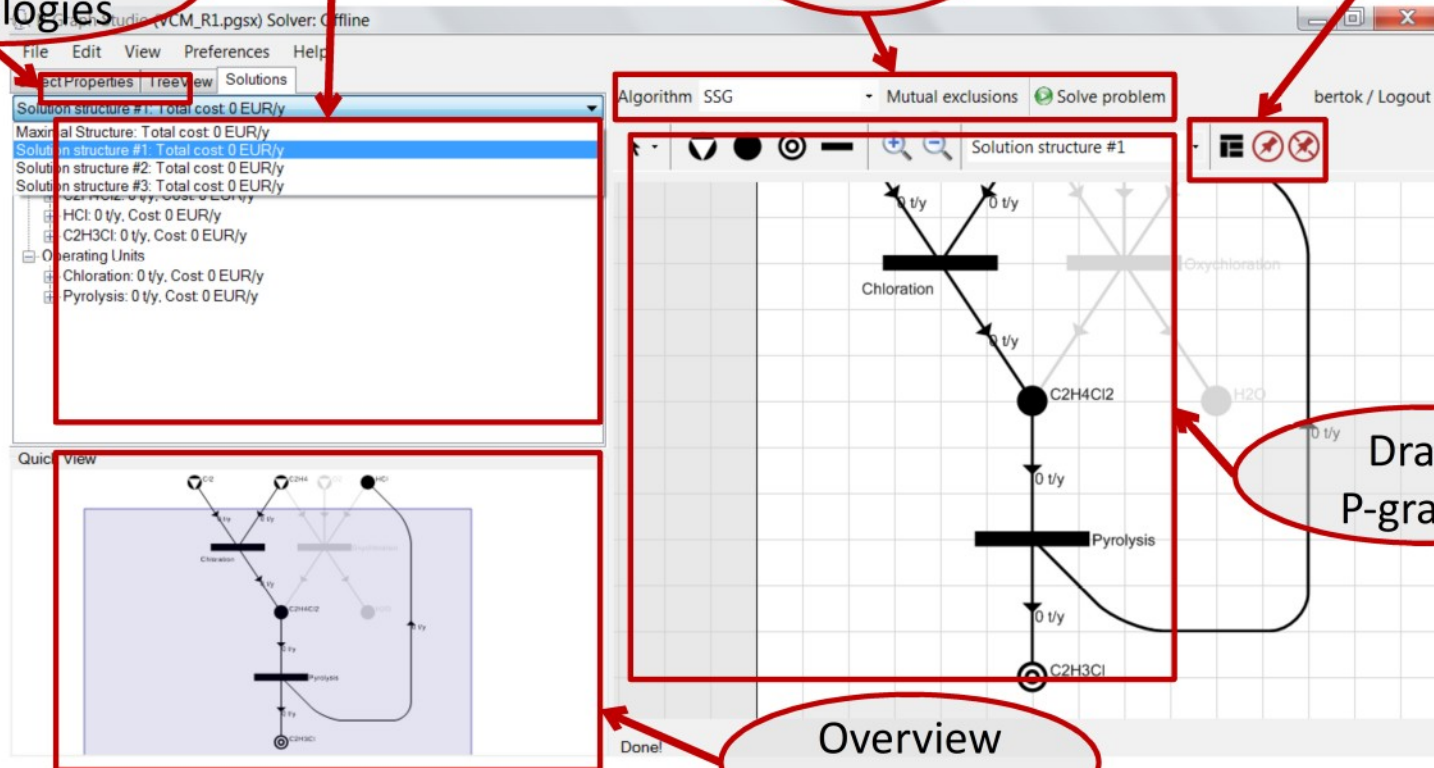
P-graph Studio 4 Capabilities

Define Technologies

Analyze Networks

Synthesize Optimal and Alternative Processes

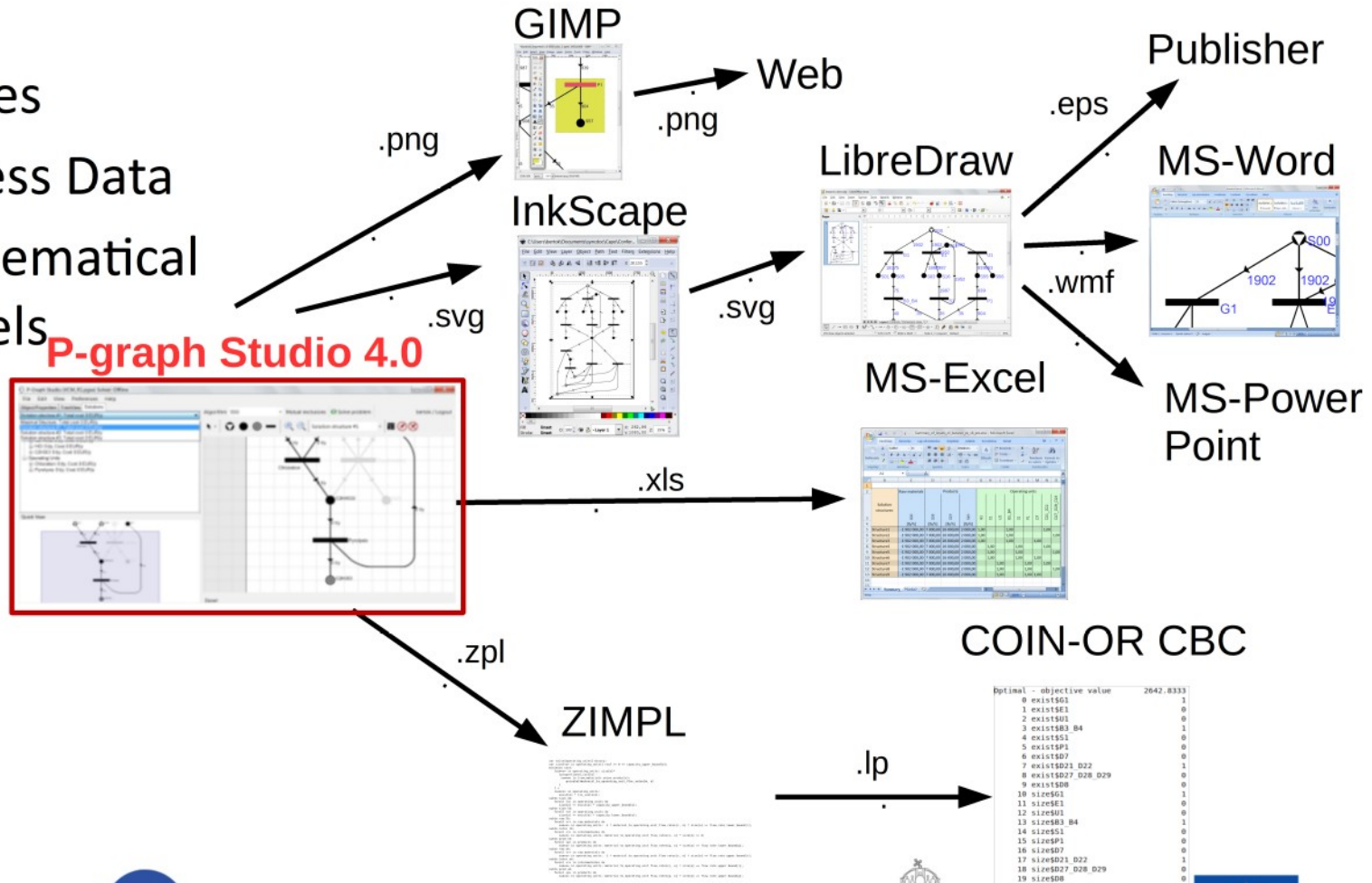
Auto-arrange layout



Overview Flowsheets

P-graph Studio 4 Export Capabilities

- Figures
- Process Data
- Mathematical Models



P-graph Studio 4 Installation: Download from <http://p-graph.org/downloads/>

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Home

About P-Graph News Education Research Business Downloads Contacts

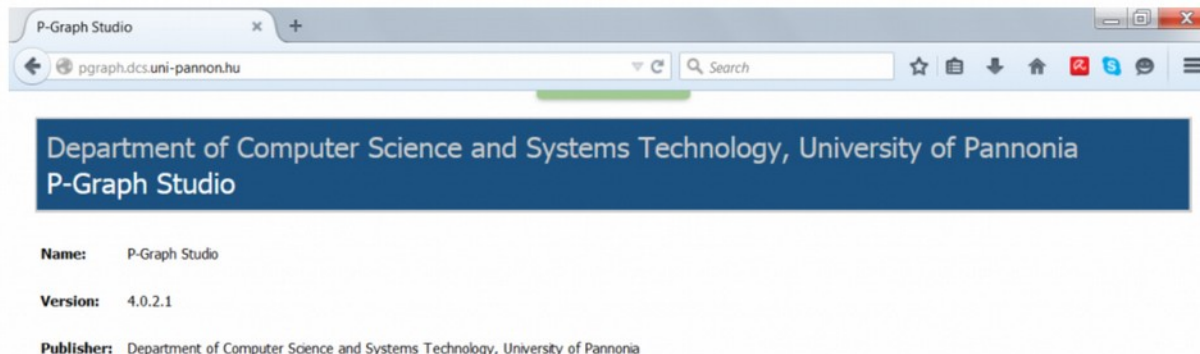
Downloads

Home > Downloads

P-Graph Studio RPIPBT Reaction Pathway Identification Software Case studies

P-Graph Studio

1. To download the software, first You have to visit <http://pgraph.dcs.uni-pannon.hu/> and click on the Install button.



P-Graph Studio

pgraph.dcs.uni-pannon.hu

Department of Computer Science and Systems Technology, University of Pannonia
P-Graph Studio

Name: P-Graph Studio

Version: 4.0.2.1

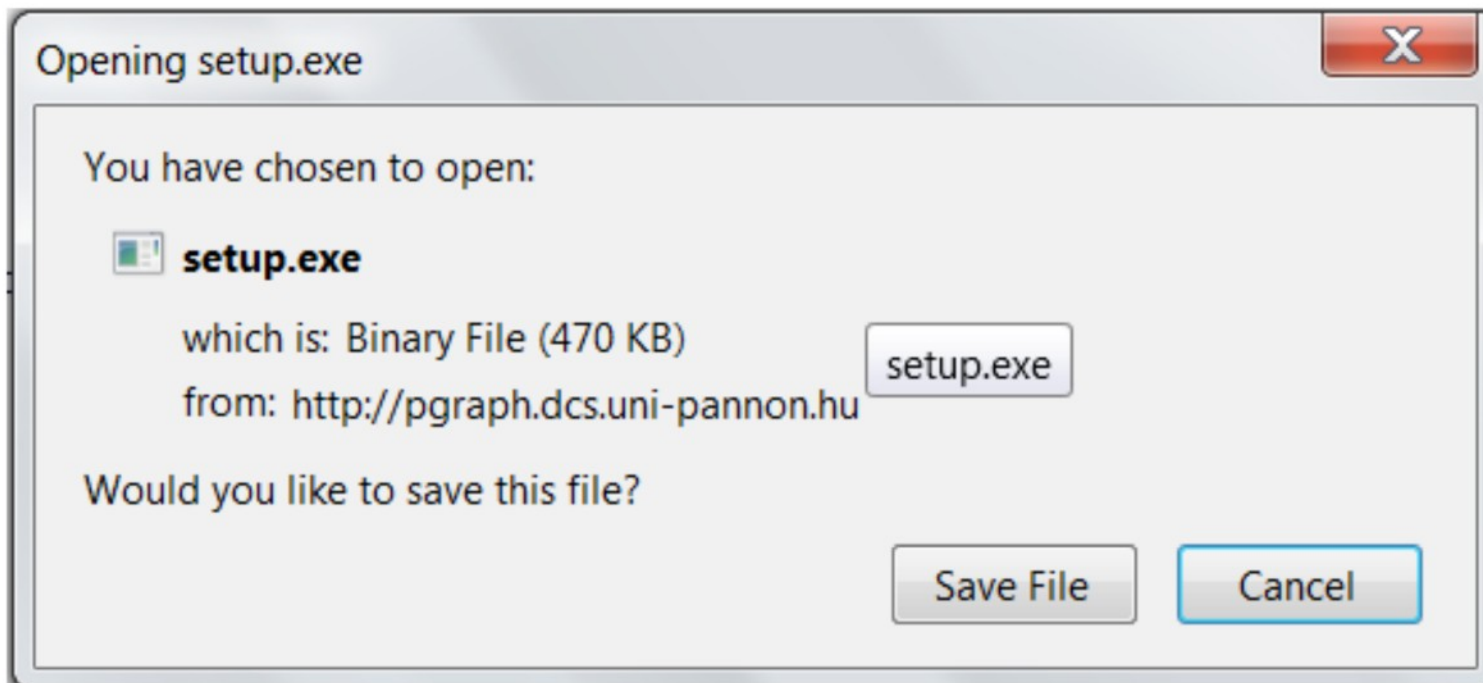
Publisher: Department of Computer Science and Systems Technology, University of Pannonia



P-graph Studio 4 Installation: Save setup.exe

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



P-graph Studio 4 Installation: Execute setup.exe

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Name: P-Graph Studio

Version: 4.0.2.1

Publisher: Department of Computer Science and Systems Technology, University of Pannonia

The following prerequisites are required:

- Microsoft .NET Framework 4.5.1 (x86 and x64)
- Windows Installer 4.5

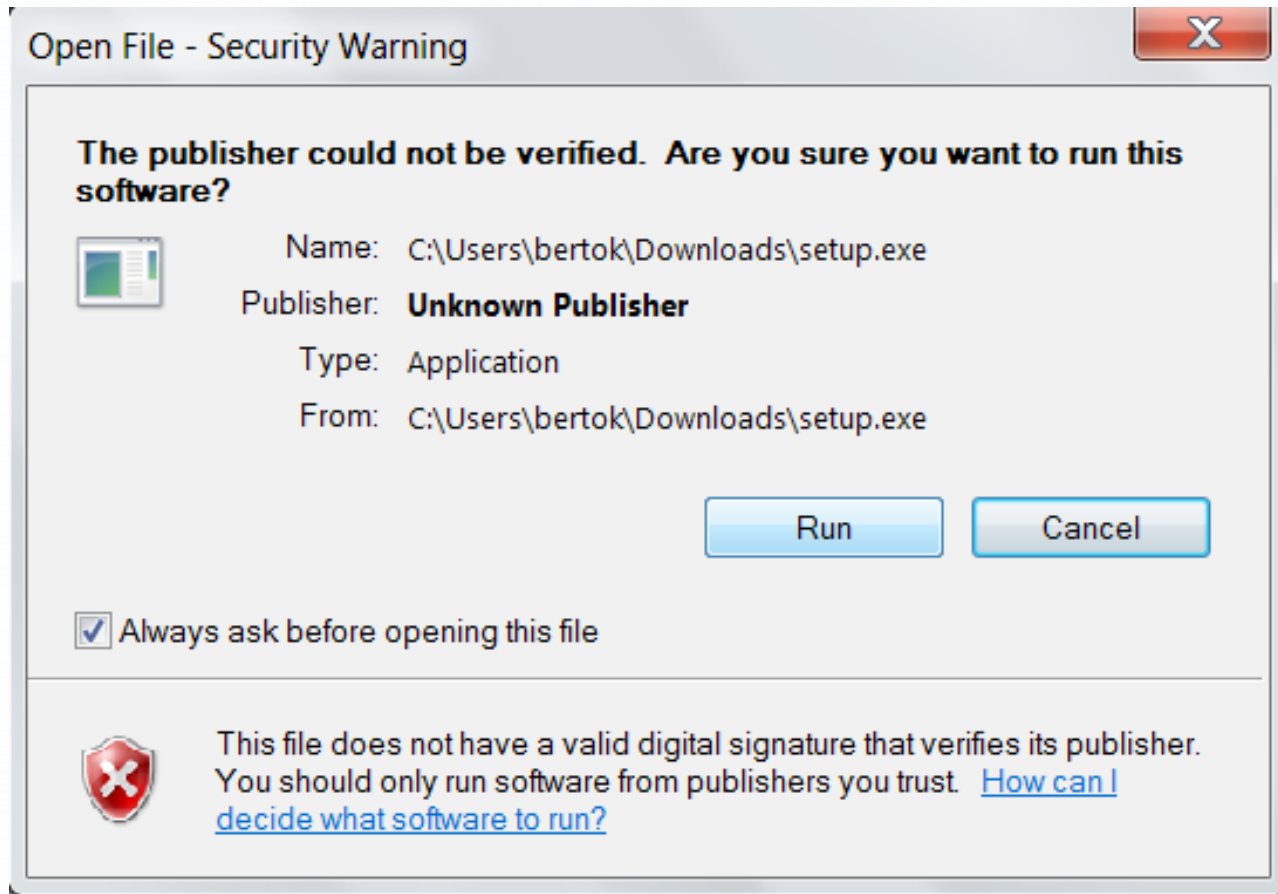
Click the button below to install the prerequisites and run the application.

[Install](#)

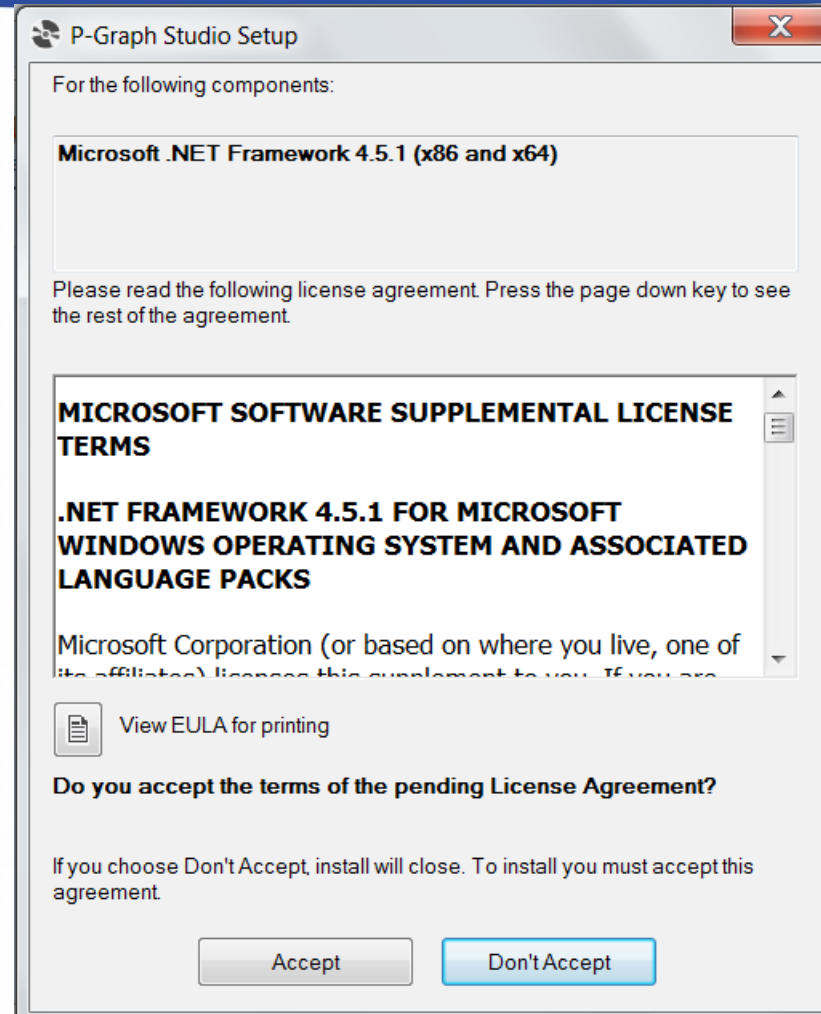
P-graph Studio 4 Installation: Assign permissions to setup.exe

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



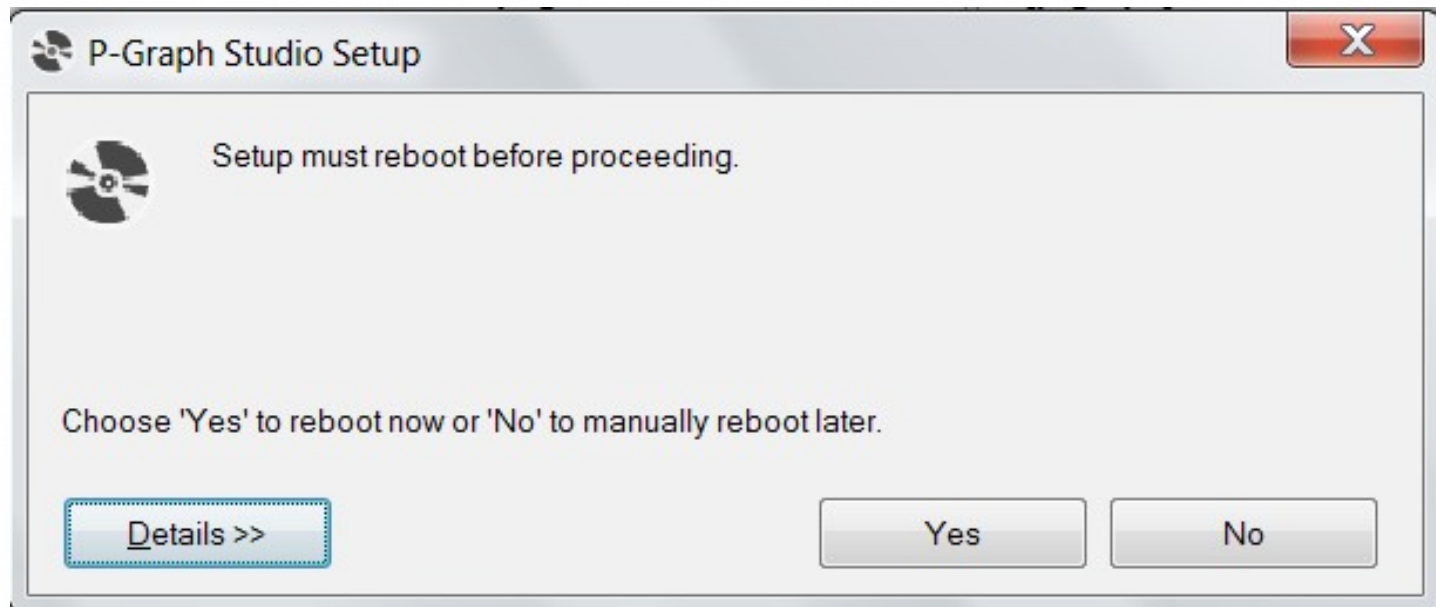
P-graph Studio 4 Installation: Update Microsoft .Net if needed



P-graph Studio 4 Installation: Allow reboot if needed

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

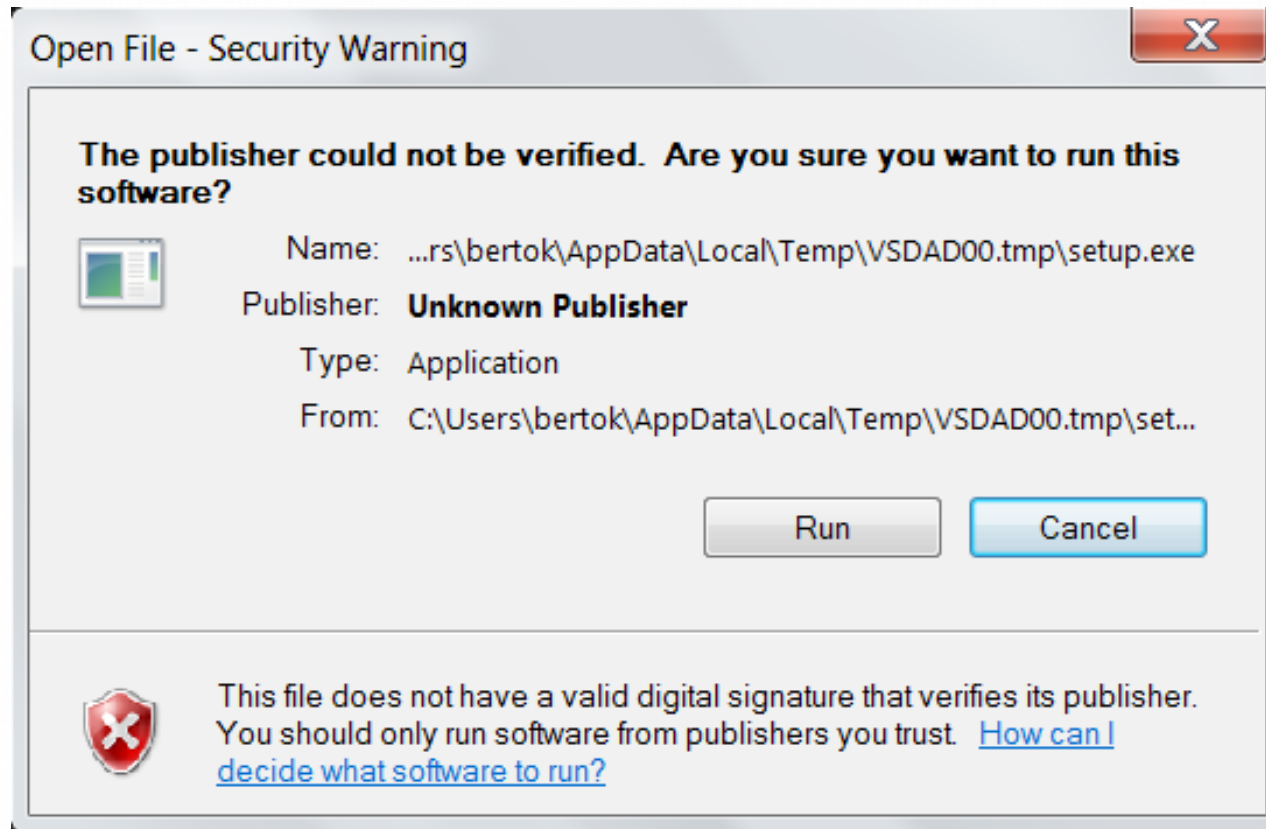
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



P-graph Studio 4 Installation: Restart setup.exe after reboot

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

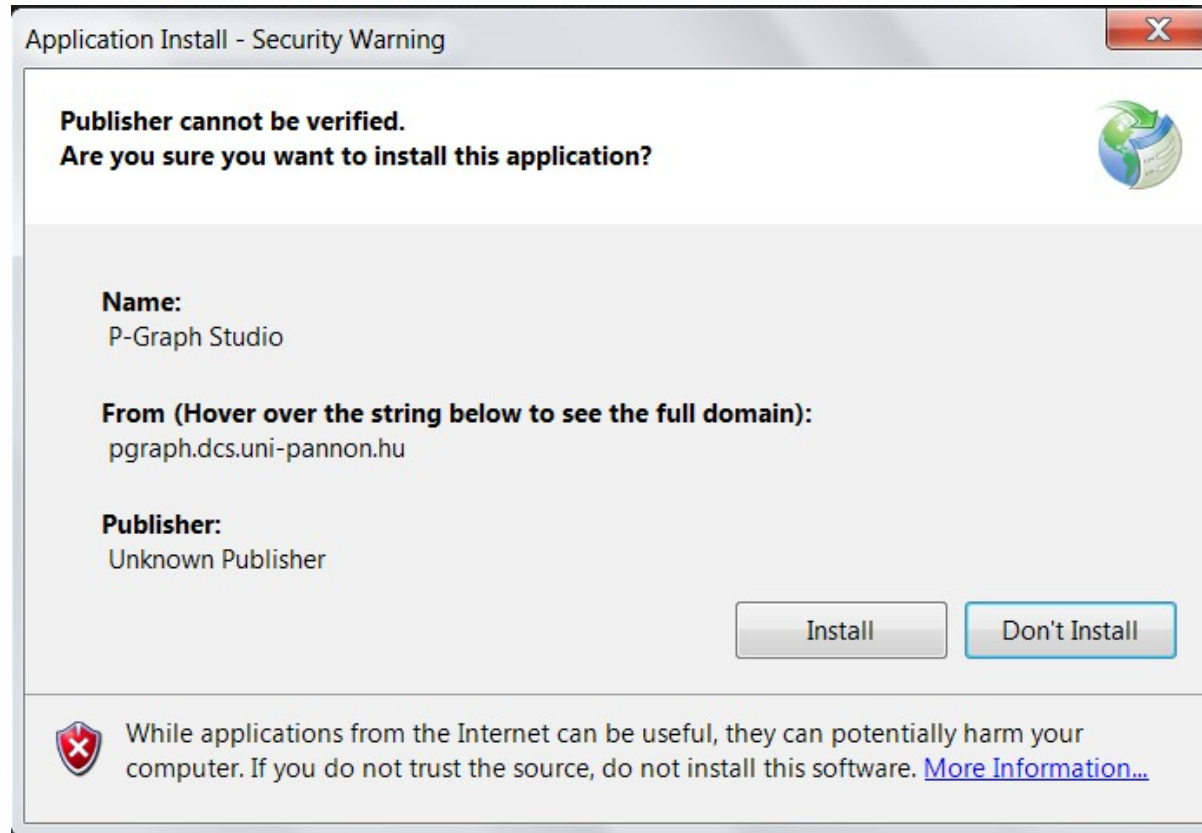
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



P-graph Studio 4 Installation: Assign permissions to setup.exe

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

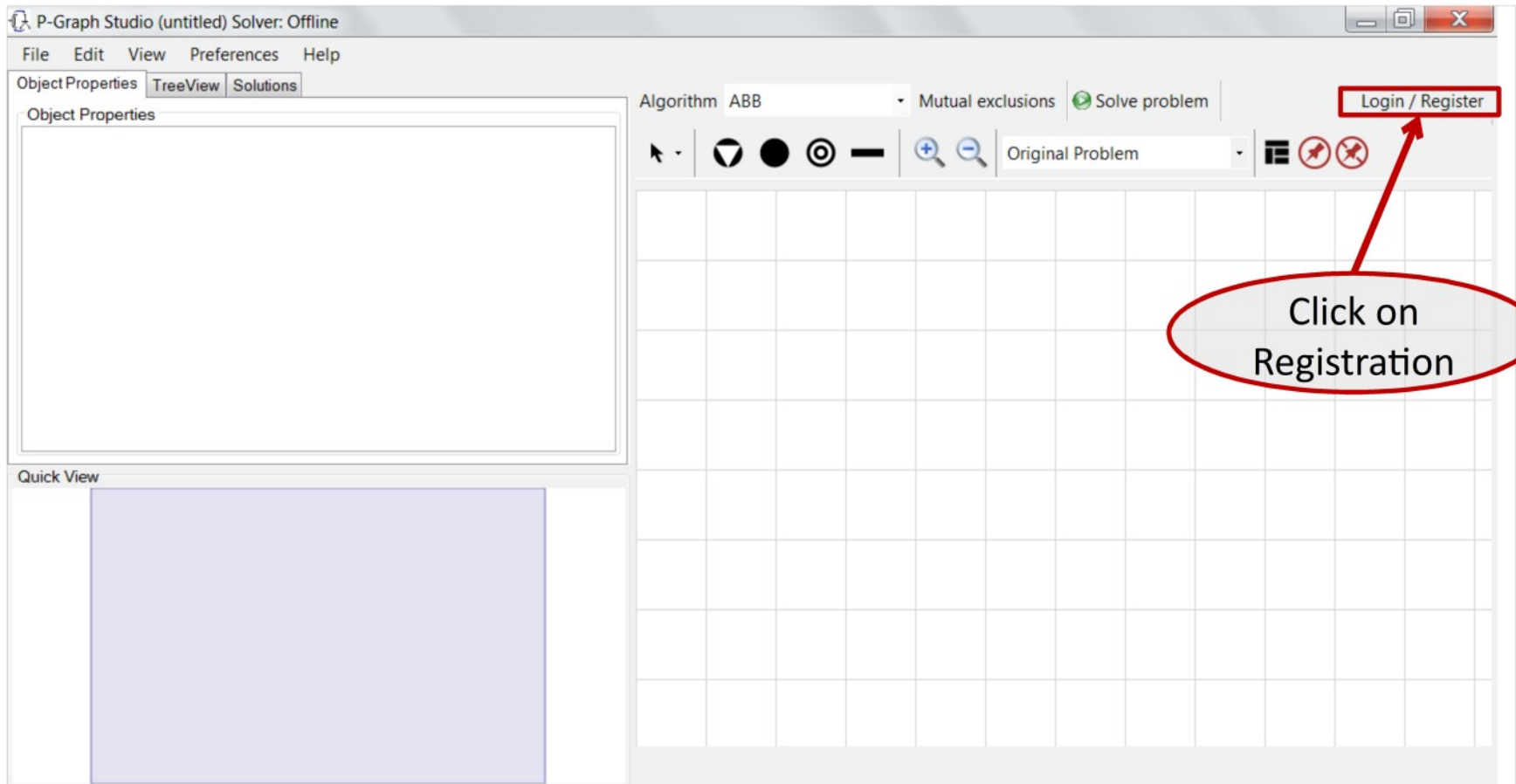
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



P-graph Studio 4 Installation: Start P-graph Studio

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



P-graph Studio 4 Installation: Fill in the Registration Form

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

The screenshot shows a window titled "User" with two main sections: "Login" and "Register".

Login Section:

- Text: "Please login by entering your username and password!"
- Fields: "Username:" and "Password:"
- Buttons: "Log in" and "Cancel"
- Link: "[I forgot my password](#)"

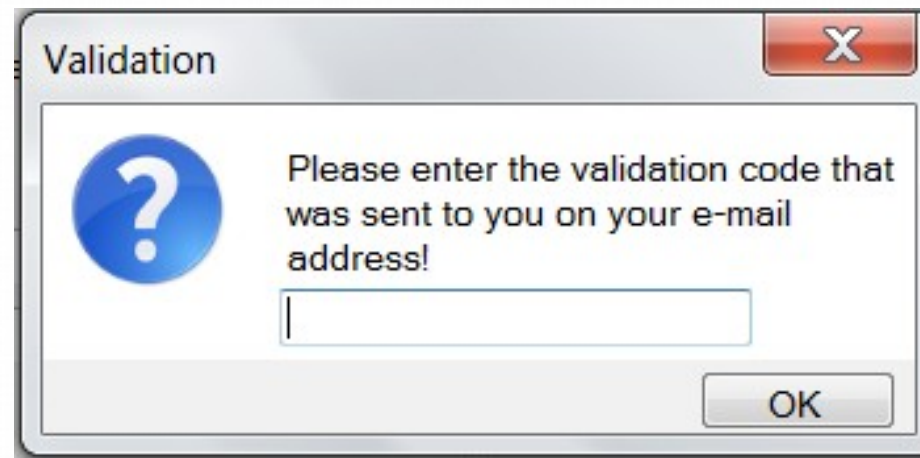
Register Section:

- Text: "If you do not have an account, please register!"
- Fields: "Username:" (filled with "bertok"), "E-mail address:" (filled with "bertok@dcs.uni-pannon.hu"), "Password:" (filled with "****"), and "Confirm password:" (filled with "****")
- Buttons: "Register" and "Cancel"

P-graph Studio 4 Installation: Enter Validation Code

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és
hozzáférhetőségének együttes javítása
a Pannon Egyetemen

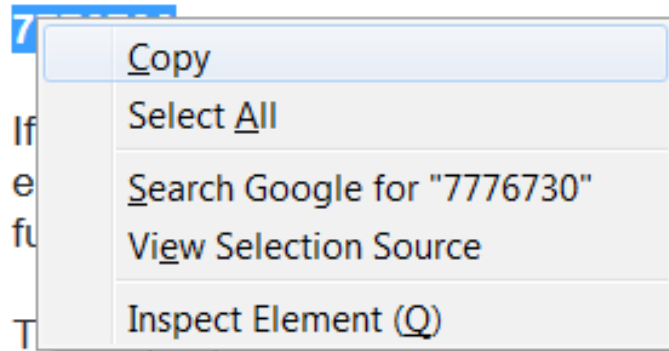


P-graph Studio 4 Installation: Copy the Validation Code from e-mail

Dear bertok,

As a final step of the P-Graph Studio account creation process, please validate the email address bertok@dcs.uni-pannon.hu

Copy and paste the confirmation code below into the application.



then someone has probably entered your
out that. You don't need to do anything

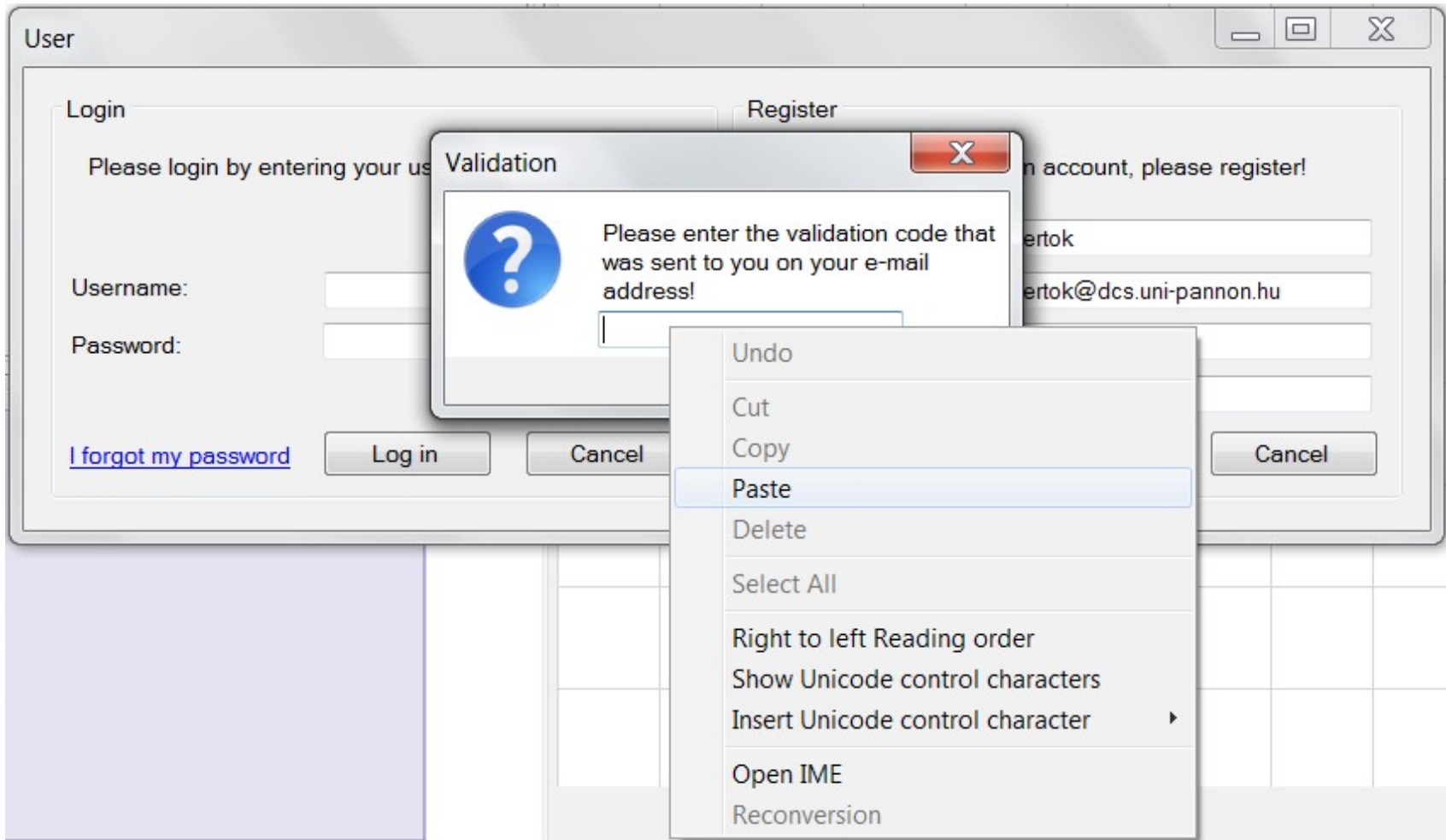
The P-Graph Studio Team

<http://www.pgraph.com>

P-graph Studio 4 Installation: Paste the Validation Code

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

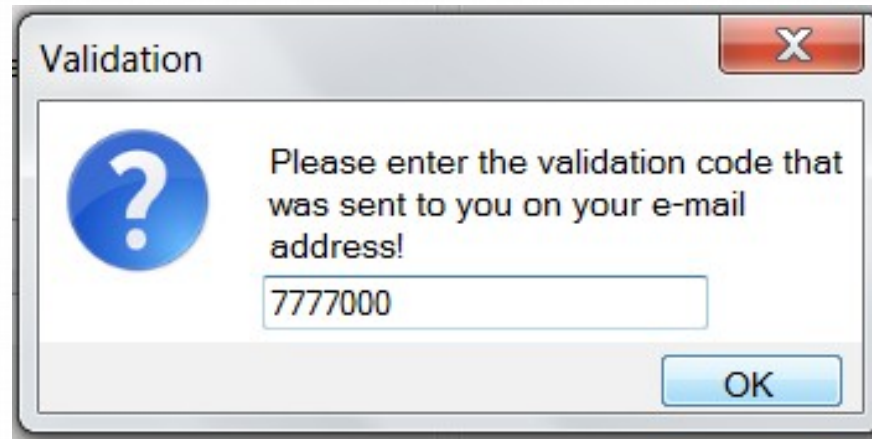
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



P-graph Studio 4 Installation: Press OK

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

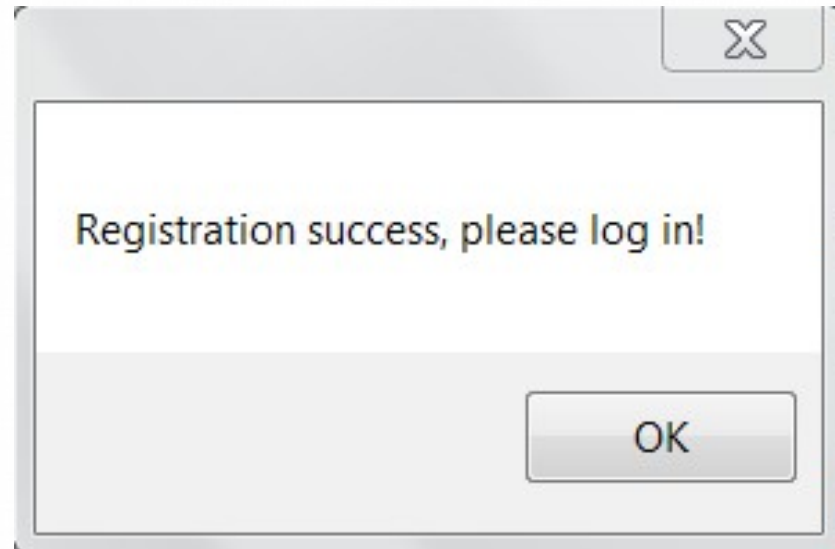
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



P-graph Studio 4 Installation: Registration Complete

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



P-graph Studio 4 Installation: Login with your Name and Password

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

The screenshot shows a 'User' dialog box with two main sections: 'Login' and 'Register'.
Login Section:
- Title: 'Login'
- Instruction: 'Please login by entering your username and password!'
- Username field: 'bertok'
- Password field: masked with '....'
- Link: '[I forgot my password](#)'
- Buttons: 'Log in' (highlighted in blue), 'Cancel'
Register Section:
- Title: 'Register'
- Instruction: 'If you do not have an account, please register!'
- Username field: empty
- E-mail address field: empty
- Password field: empty
- Confirm password field: empty
- Buttons: 'Register', 'Cancel'

Reaction-Network Synthesis for VCM: Drag Material node to the canvas

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Reaction-Network Synthesis for VCM: Drag Material node to the canvas

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

The screenshot displays the P-Graph Studio software interface. The window title is "P-Graph Studio (*untitled) Solver: Offline". The menu bar includes "File", "Edit", "View", "Preferences", and "Help". Below the menu bar, there are tabs for "Object Properties", "TreeView", and "Solutions". The "Object Properties" panel on the left is currently empty. The main workspace is a grid where a node labeled "material_1" is being dragged. The node is represented by a black circle with a white inverted triangle inside. The toolbar at the top right contains various icons for navigation and editing, including a mouse cursor, a black circle, a white circle, a target, a horizontal line, a magnifying glass with a plus sign, a magnifying glass with a minus sign, a dropdown menu showing "Original Problem", and two red icons with diagonal lines. The "Algorithm" dropdown is set to "ABB", and the "Mutual exclusions" section has a "Solve problem" button. The user name "bertok / Logout" is visible in the top right corner. The "Quick View" panel at the bottom left shows a larger version of the "material_1" node icon and its label.



Reaction-Network Synthesis for VCM: Edit Material name

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

The screenshot shows the P-Graph Studio interface. The title bar reads 'P-Graph Studio (*untitled) Solver: Offline'. The menu bar includes 'File', 'Edit', 'View', 'Preferences', and 'Help'. Below the menu bar are tabs for 'Object Properties', 'TreeView', and 'Solutions'. The 'Object Properties' window is open, displaying the following data:

Object Properties	
Parameters	
Type	Raw Material
Name	material_1
Price	0 EUR/y
Req. flow	0 t/y
Max. flow	1000000000 t/y
Quantity Type	Mass
Measurement Unit	ton (t)
Price unit	EUR/y
Comment	
Style	
Node	
Label	
Comment	
Parameters	

To the right of the properties window is a workspace with a grid. At the top right, there is a dropdown menu for 'Algorithm' set to 'ABB' and a 'Mutual exc' label. Below this are several icons: a mouse cursor, a downward-pointing triangle, a solid black circle, a target symbol, a horizontal line, and two magnifying glass icons. In the workspace, a node is represented by a downward-pointing triangle inside a circle, which is highlighted with a red circle. A label 'material_1' is attached to this node.

Reaction-Network Synthesis for VCM: Edit Material name

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

P-Graph Studio (*untitled) Solver: Offline

File Edit View Preferences Help

Object Properties TreeView Solutions

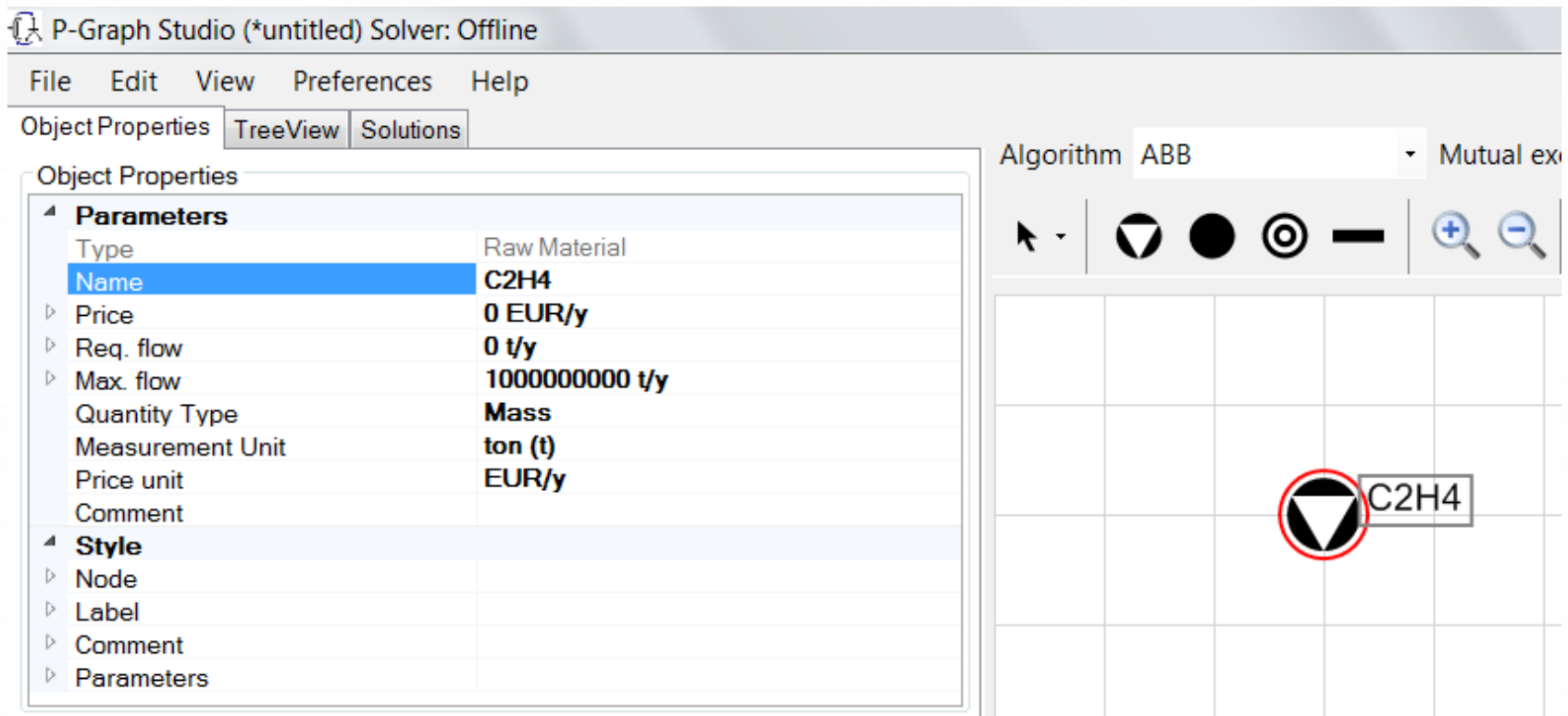
Object Properties

Parameters	
Type	Raw Material
Name	C2H4
Price	0 EUR/y
Req. flow	0 t/y
Max. flow	1000000000 t/y
Quantity Type	Mass
Measurement Unit	ton (t)
Price unit	EUR/y
Comment	

Style

- Node
- Label
- Comment
- Parameters

Algorithm ABB Mutual ex



Reaction-Network Synthesis for VCM: Drag and Name Reaction node

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

The screenshot displays the P-Graph Studio software interface. The main window is titled "P-Graph Studio (*untitled) Solver: Offline". The interface includes a menu bar (File, Edit, View, Preferences, Help), a toolbar with various icons, and a main workspace with a grid. In the workspace, several reaction nodes are visible: C_2H_4 , Cl_2 , $C_2H_4Cl_2$, and a node labeled "Chloration" which is highlighted with a red rectangular box. The "Chloration" node is represented by a black rectangle. The "Object Properties" panel on the left shows the following parameters for the selected node:

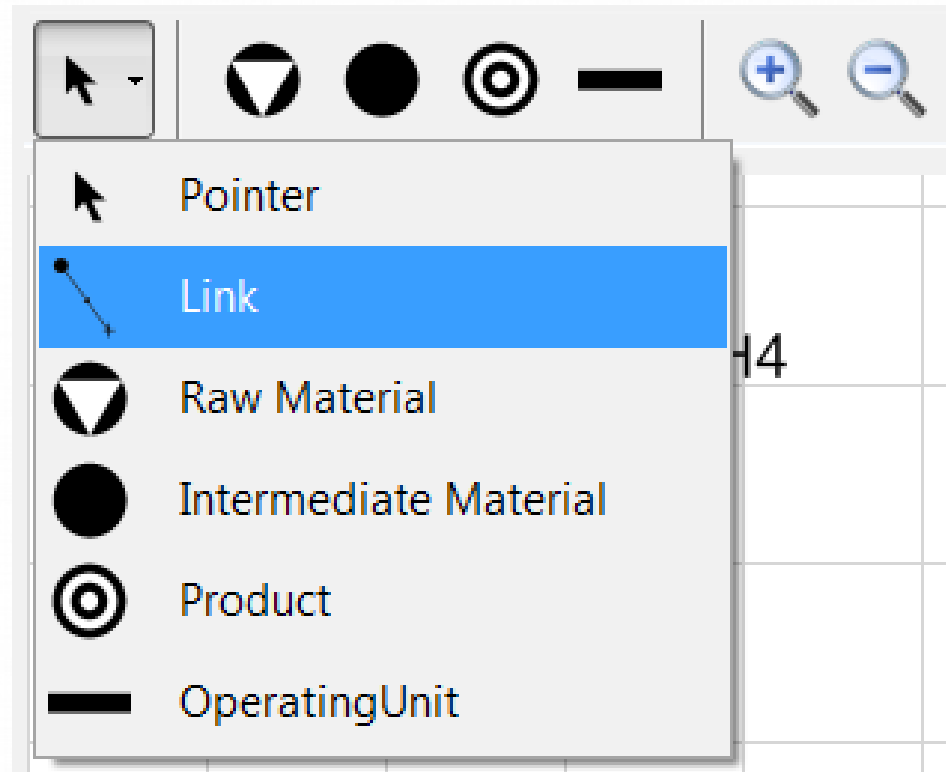
Object Properties	
Type	Operating Unit
Name	Chloration
Capacity - lower bound:	0 t/y
Capacity - upper bound:	1000000000 t/y
Investment cost - fix:	0 EUR/y
Investment cost - proportional:	0 EUR/y
Operating cost - fix:	0 EUR/y
Operating cost - proportional:	0 EUR/y
Payout period:	10
Working hour per year:	8000
Quantity Type	Mass
Measurement Unit	ton (t)/y
Price unit	EUR/y
Comment	

The "Quick View" panel at the bottom left provides a smaller overview of the reaction network, showing the same nodes as the main workspace.

Reaction-Network Synthesis for VCM: Select the Link tool

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Reaction-Network Synthesis for VCM: Link materials to reactions by clicks

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

The screenshot displays the P-Graph Studio interface. On the left, the 'Object Properties' panel shows parameters for 'Chloration':

Parameter	Value	Operating Unit
Name	Chloration	Chloration
Capacity - lower bound:	0	t/y
Capacity - upper bound:	1000000000	t/y
Investment cost - fix:	0	EUR/y
Investment cost - proportional:	0	EUR/y
Operating cost - fix:	0	EUR/y
Operating cost - proportional:	0	EUR/y
Payout period:	10	
Working hour per year:	8000	
Quantity Type	Mass	
Measurement Unit	ton (t)/y	
Price unit	EUR/y	
Comment		

The main workspace shows a reaction network on a grid. Nodes include C2H4, Cl2, C2H4Cl2, and a reaction node 'Chloration' (highlighted with a red box). An arrow points from C2H4 to 'Chloration' with the label $\times X_{\text{Chloration}} \text{ t/y}$. The 'Quick View' panel at the bottom left provides a smaller version of this diagram.

Reaction-Network Synthesis for VCM: Link materials to reactions by clicks

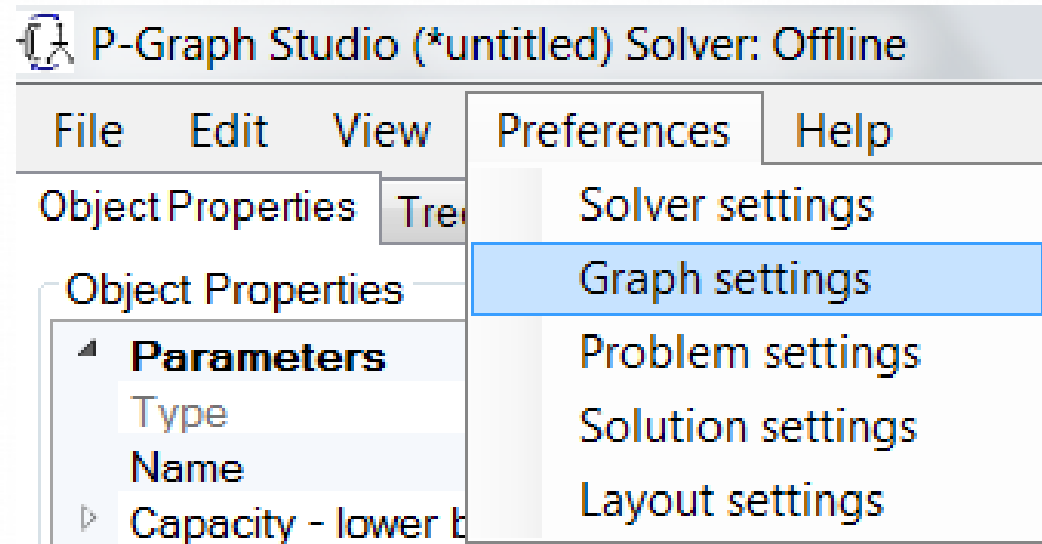
EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

The screenshot displays the P-Graph Studio interface. On the left, the 'Object Properties' panel shows parameters for the 'Chloration' reaction, such as capacity, investment cost, and operating cost. The main workspace shows a reaction network with nodes for C2H4, Cl2, Chloration, and C2H4Cl2. The Chloration node is highlighted with a red box. The network is defined by the following reactions:

- C2H4 + Cl2 → Chloration (flow: $1 \times X_{\text{Chloration}}$)
- Chloration → C2H4Cl2 (flow: $1 \times X_{\text{Chloration}}$)

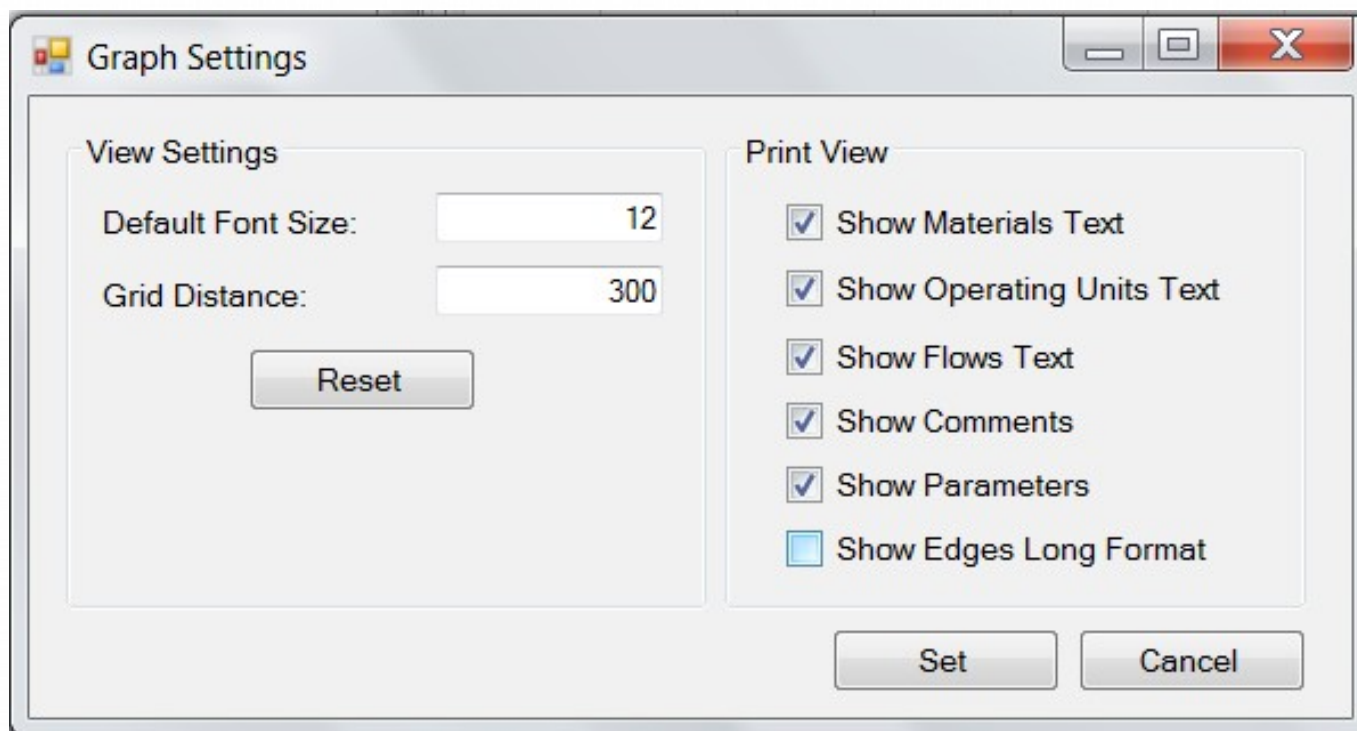
Reaction-Network Synthesis for VCM: Select Graph settings from the Menu



Reaction-Network Synthesis for VCM: Switch off Long Format

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Reaction-Network Synthesis for VCM: Model variables disappears

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

P-Graph Studio (*untitled) Solver: Offline

File Edit View Preferences Help

Object Properties TreeView Solutions

Object Properties

- Parameters
- Type: Operating Unit
- Name: **Chloration**
- Capacity - lower bound: **0 t/y**
- Capacity - upper bound: **100000000 t/y**
- Investment cost - fix: **0 EUR/y**
- Investment cost - proportional: **0 EUR/y**
- Operating cost - fix: **0 EUR/y**
- Operating cost - proportional: **0 EUR/y**
- Payout period: **10**
- Working hour per year: **8000**
- Quantity Type: **Mass**
- Measurement Unit: **ton (t)/y**
- Price unit: **EUR/y**
- Comment:

Quick View

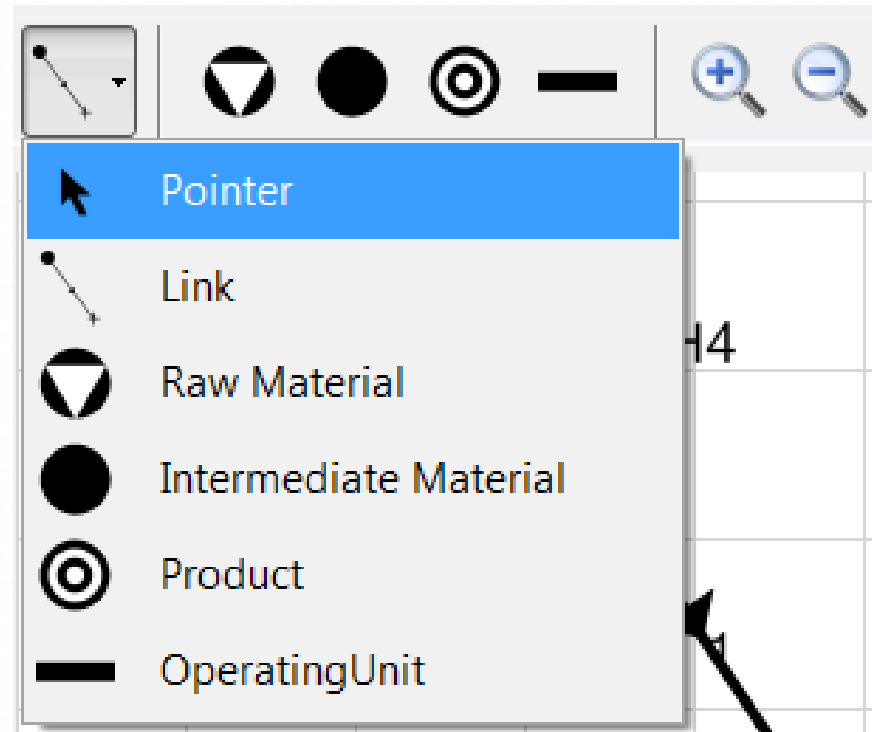
Algorithm: ABB Mutual exclusions Solve problem bertok / Logout

Original Problem

Reaction-Network Synthesis for VCM: Select the Pointer tool

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Reaction-Network Synthesis for VCM: Click on an Arc and change Rate

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

P-Graph Studio (*untitled) Solver: Offline

File Edit View Preferences Help

Object Properties TreeView Solutions

Object Properties

- Parameters
 - Type Edge
 - Rate 2
- Style
 - Edge
 - Label

Algorithm ABB Mutual exclusions Solve problem bertok / Logout

Original Problem

Cl₂ C₂H₄ O₂ HCl

Chloration Oxychloration

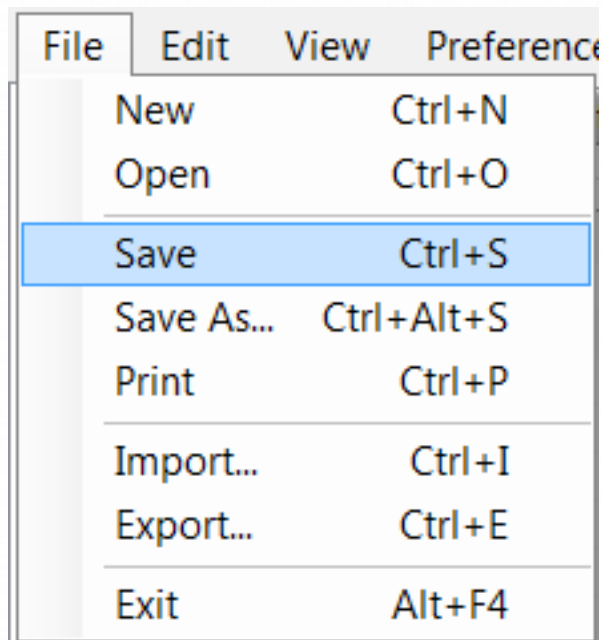
Pyrolysis

material_3

Reaction-Network Synthesis for VCM: Save the Initial Network

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

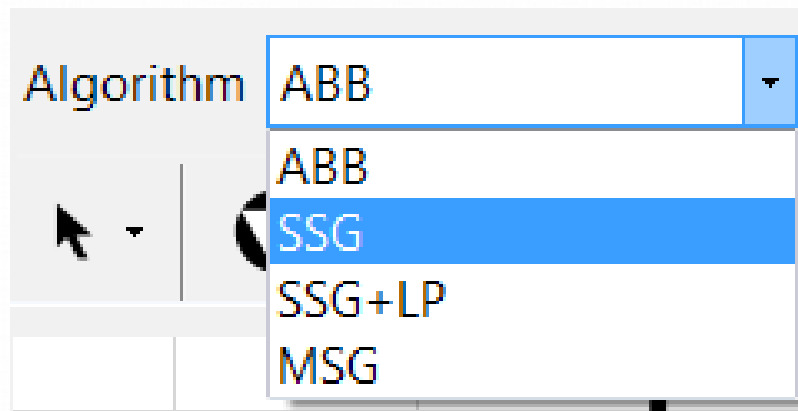
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Reaction-Network Synthesis for VCM: Select Algorithm SSG

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

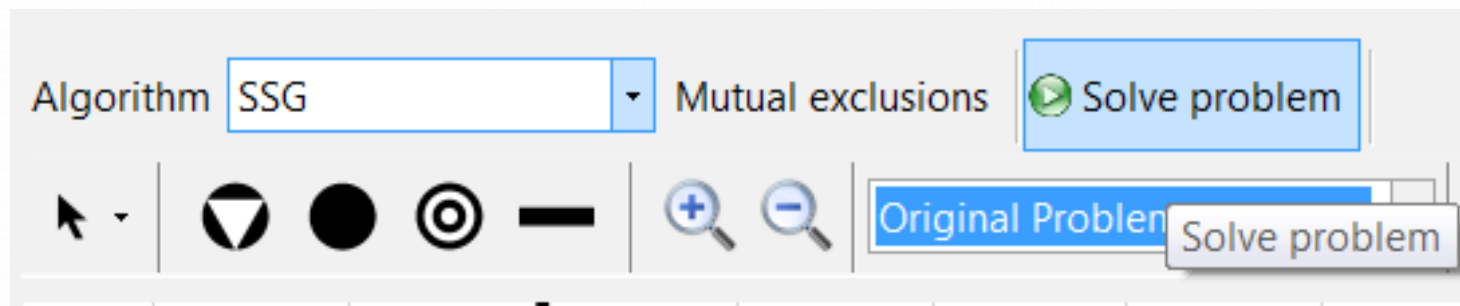
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Reaction-Network Synthesis for VCM: Execute Algorithm SSG

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Reaction-Network Synthesis for VCM: Combinatorially Feasible Structures

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

The screenshot shows a software interface with three tabs: 'Object Properties', 'TreeView', and 'Solutions'. The 'Solutions' tab is active, displaying a list of solutions and a detailed tree view of the selected solution.

Solutions List:

- Maximal Structure: Total cost 0 EUR/y
- Maximal Structure: Total cost 0 EUR/y
- Solution structure #1: Total cost 0 EUR/y
- Solution structure #2: Total cost 0 EUR/y
- Solution structure #3: Total cost 0 EUR/y
- Solution structure #4: Total cost 0 EUR/y

Tree View Details:

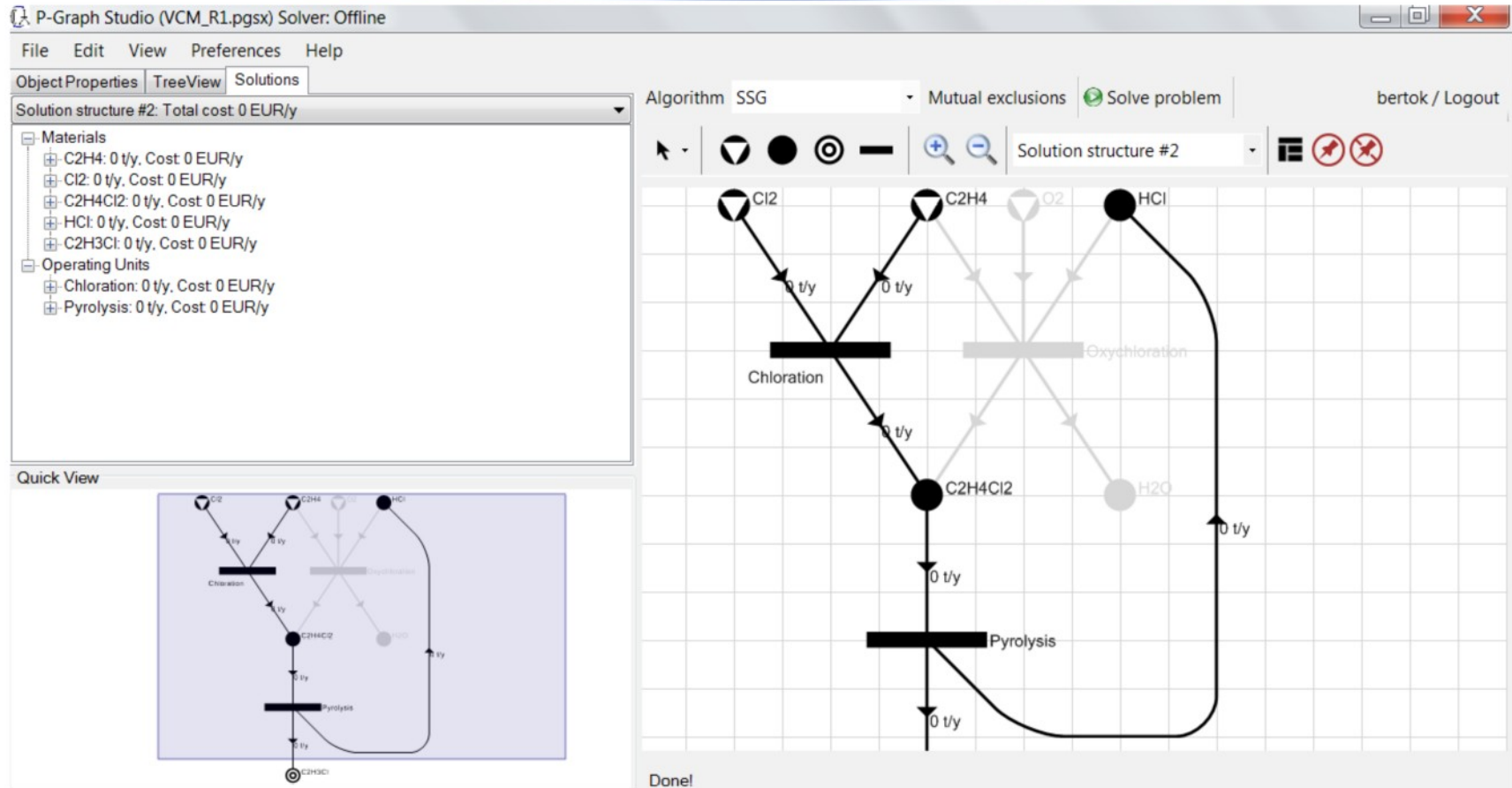
- + Cl: 0 t/y, Cost 0 EUR/y
- + C2H3Cl: 0 t/y, Cost 0 EUR/y
- + H2O: 0 t/y, Cost 0 EUR/y
- + O2: 0 t/y, Cost 0 EUR/y
- Operating Units
 - + Chloration: 0 t/y, Cost 0 EUR/y
 - + Oxychloration: 0 t/y, Cost 0 EUR/y
 - + Pyrolysis: 0 t/y, Cost 0 EUR/y



Reaction-Network Synthesis for VCM: Combinatorially Feasible Structure #2

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

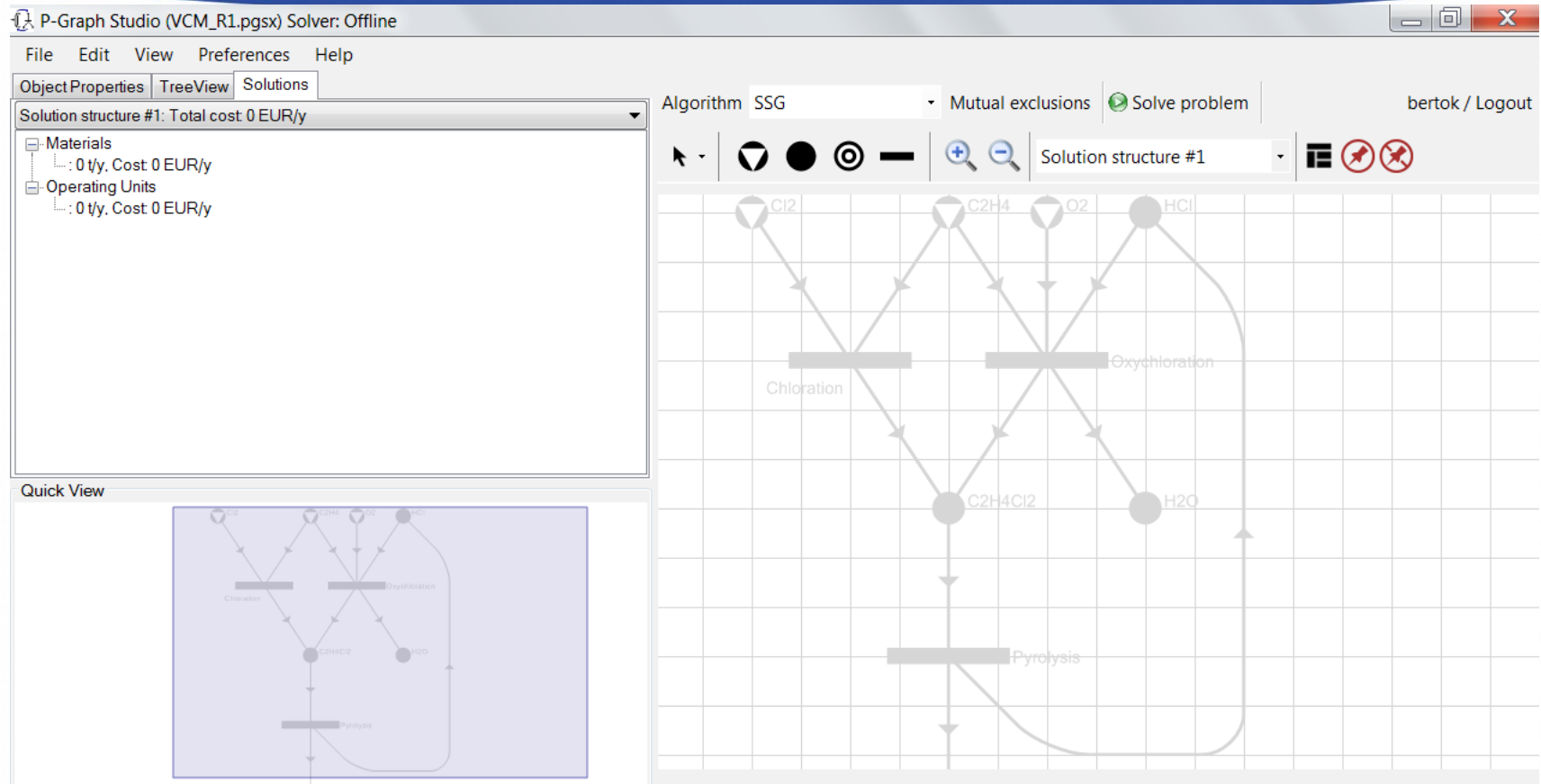
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Reaction-Network Synthesis for VCM: Feasible Empty Structure

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

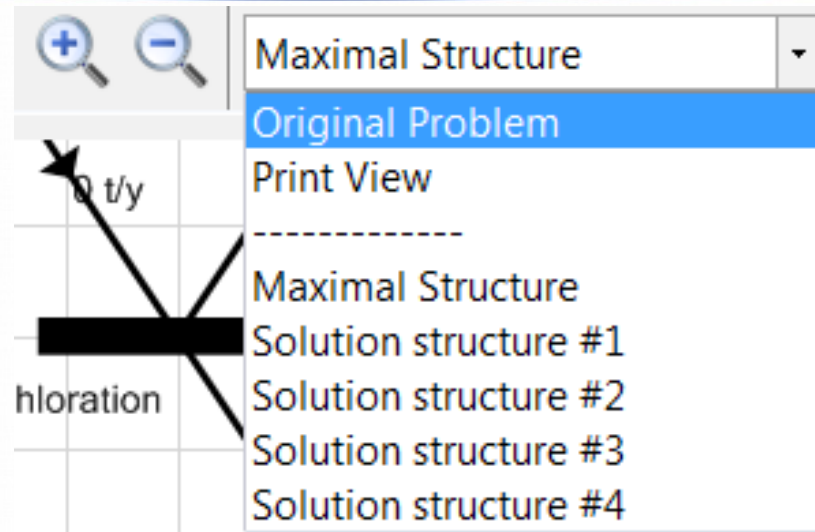
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Reaction-Network Synthesis for VCM: Switch back to Problem view

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Reaction-Network Synthesis for VCM: Specify Required Product by Flow Rate

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

P-Graph Studio (VCM_R1.pgxs) Solver: Offline

File Edit View Preferences Help

Object Properties TreeView Solutions

Object Properties

Parameters

Type	Product Material
Name	C2H3Cl
Price	0 EUR/y
Req. flow	0 t/y
Max. flow	1000000000 t/y
Quantity Type	Mass
Measurement Unit	ton (t)
Price unit	EUR/y
Comment	

Style

- Node
- Label
- Comment
- Parameters

Quick View

Algorithm SSG Mutual exclusions Solve problem bertok / Logout

Original Problem

Done!

Reaction-Network Synthesis for VCM: Check Product Flow Rate

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

P-Graph Studio (VCM_R1.pgxsx) Solver: Offline

File Edit View Preferences Help

Object Properties TreeView Solutions

Object Properties

- Parameters
 - Type: Product Material
 - Name: C2H3Cl
 - Price: 0 EUR/y
 - Req. flow: 0 t/y
 - Max. flow: 1000000000 t/y
 - Quantity Type: Mass
 - Measurement Unit: ton (t)
 - Price unit: EUR/y
- Style
 - Node
 - Label
 - Comment
 - Parameters

Quick View

Algorithm: SSG Mutual exclusions Solve problem bertok / Logout

Original Problem

Chloration Oxychlorination

C2H4Cl2 H2O

Pyrolysis

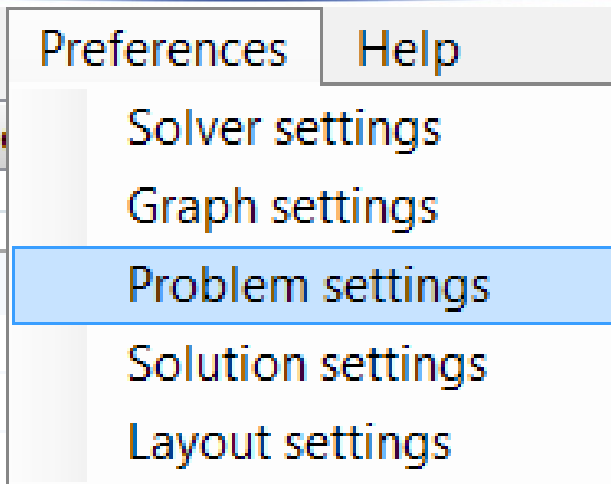
C2H3Cl

Done!

Reaction-Network Synthesis for VCM: Select Problem settings from the Menu

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Reaction-Network Synthesis for VCM: Modify Measurement Units if needed

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Problem Settings

Measurement Units Default Values

Set measurement units for the actual problem

Quantity type	Mass
Default unit	ton (t)
Time unit	year
Money unit	EUR

Set Cancel

Reaction-Network Synthesis for VCM: Specify Required Product by Flow Rate

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

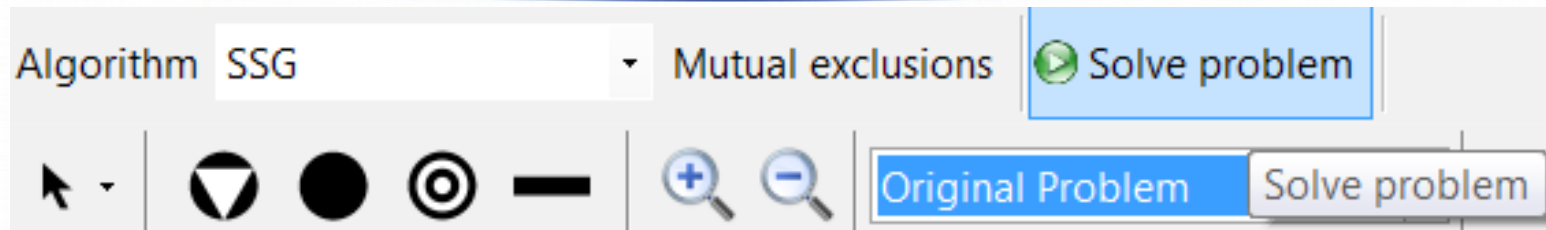
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Object Properties	
Object Properties	
▲ Parameters	
Type	Product Material
Name	C2H3Cl
▶ Price	0 EUR/y
▶ Req. flow	2 t/y
▶ Max. flow	1000000000 t/y
Quantity Type	Mass
Measurement Unit	ton (t)
Price unit	EUR/y
Comment	
▲ Style	
▶ Node	
▶ Label	
▶ Comment	
▶ Parameters	

Reaction-Network Synthesis for VCM: Execute Algorithm SSG

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

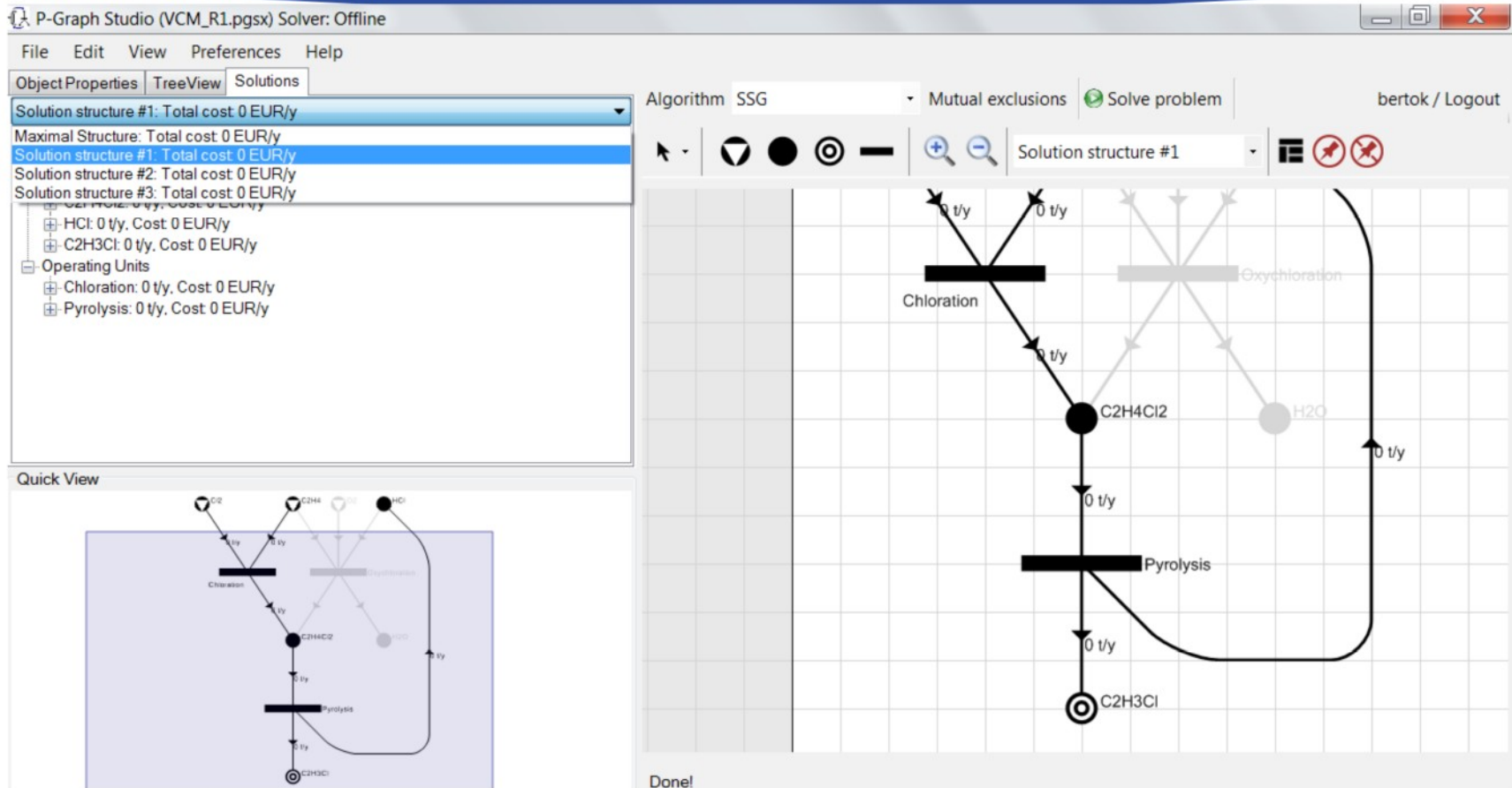
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Reaction-Network Synthesis for VCM: No Empty Structure Anymore

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

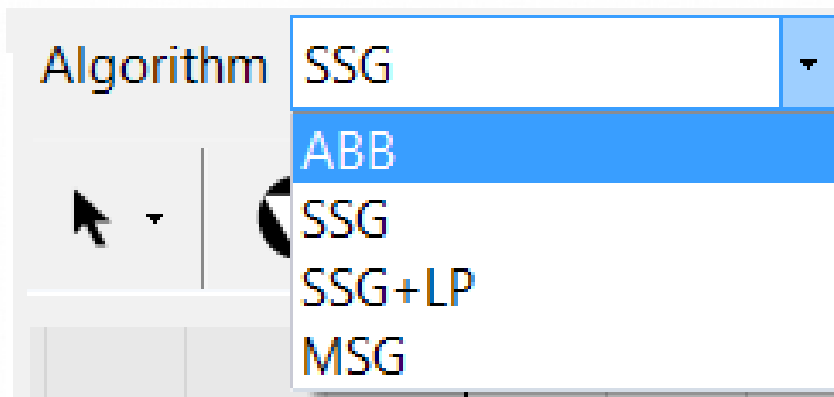
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Reaction-Network Synthesis for VCM: Select Algorithm ABB

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

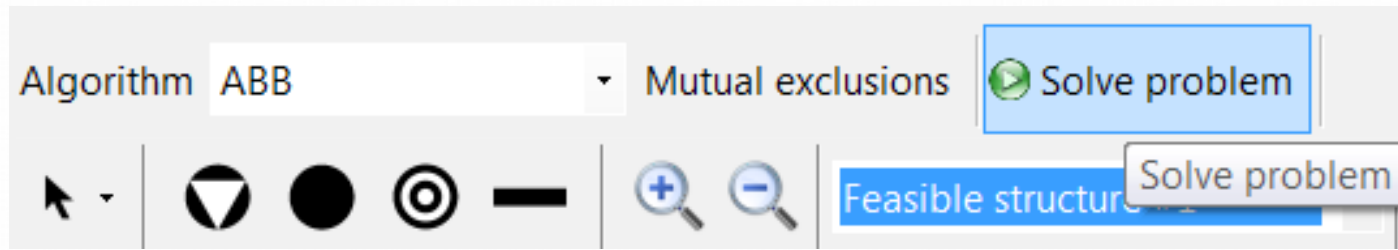
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Reaction-Network Synthesis for VCM: Start the Synthesis Algorithm

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Reaction-Network Synthesis for VCM: Browse Feasible Structures

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

P-Graph Studio (VCM_R1.pgxs) Solver: Offline

File Edit View Preferences Help

ObjectProperties TreeView Solutions

Feasible structure #2: Total cost 0 EUR/y

- Materials
 - C2H4: -2 t/y, Cost 0 EUR/y
 - Cl2: -2 t/y, Cost 0 EUR/y
 - C2H4Cl2: 0 t/y, Cost 0 EUR/y
 - HCl: 2 t/y, Cost 0 EUR/y
 - C2H3Cl: 2 t/y, Cost 0 EUR/y
- Operating Units
 - Chloration: 2 t/y, Cost 0 EUR/y
 - Pyrolysis: 2 t/y, Cost 0 EUR/y

Algorithm ABB Mutual exclusions Solve problem bertok / Logout

Feasible structure #2

- Original Problem
- Print View
-
- Maximal Structure
- Feasible structure #1
- Feasible structure #2

Chloration Oxychloration Pyrolysis

Cl2 C2H4 C2H4Cl2 H2C C2H3Cl

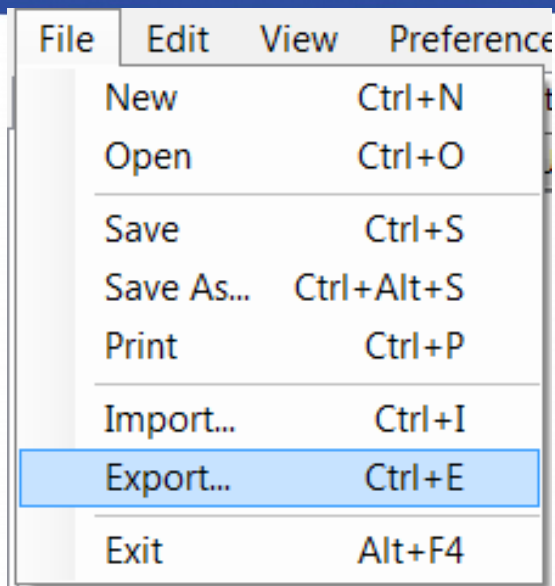
2 t/y 2 t/y 2 t/y 2 t/y 2 t/y

Done!

Reaction-Network Synthesis for VCM: Select Export

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

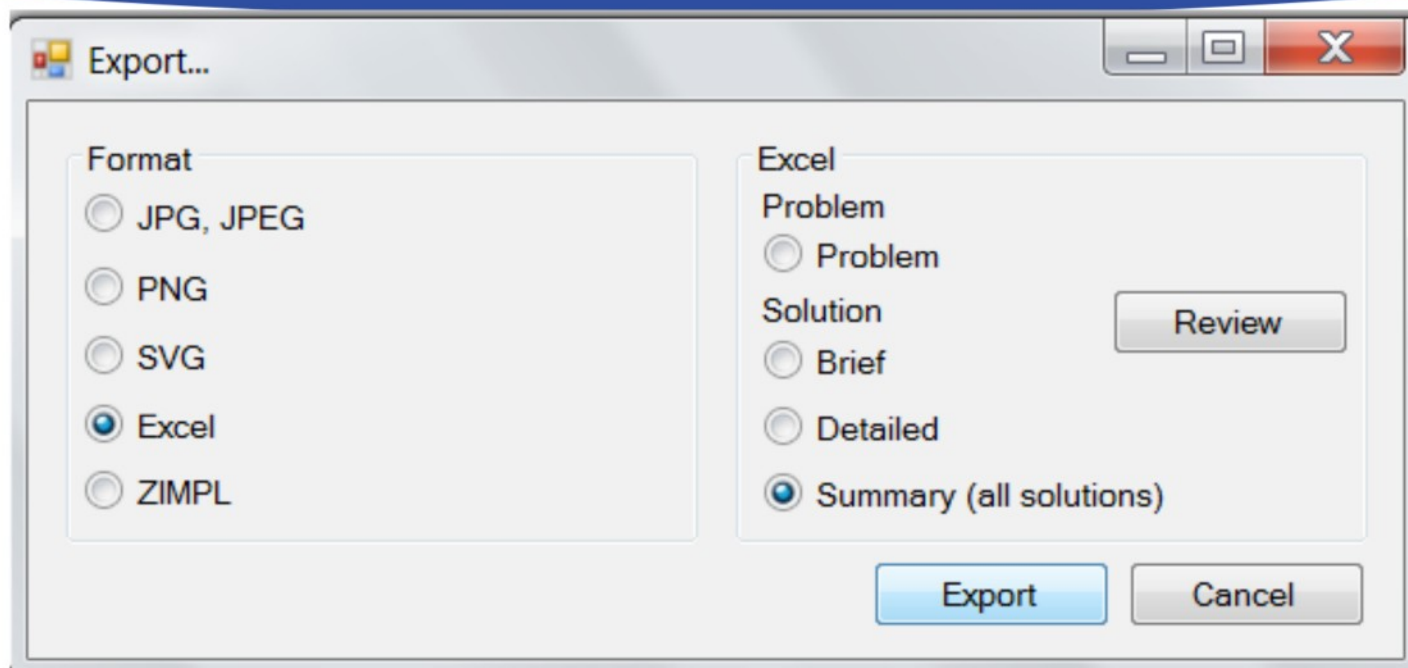
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Reaction-Network Synthesis for VCM: Select Excel and Solution Summary

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

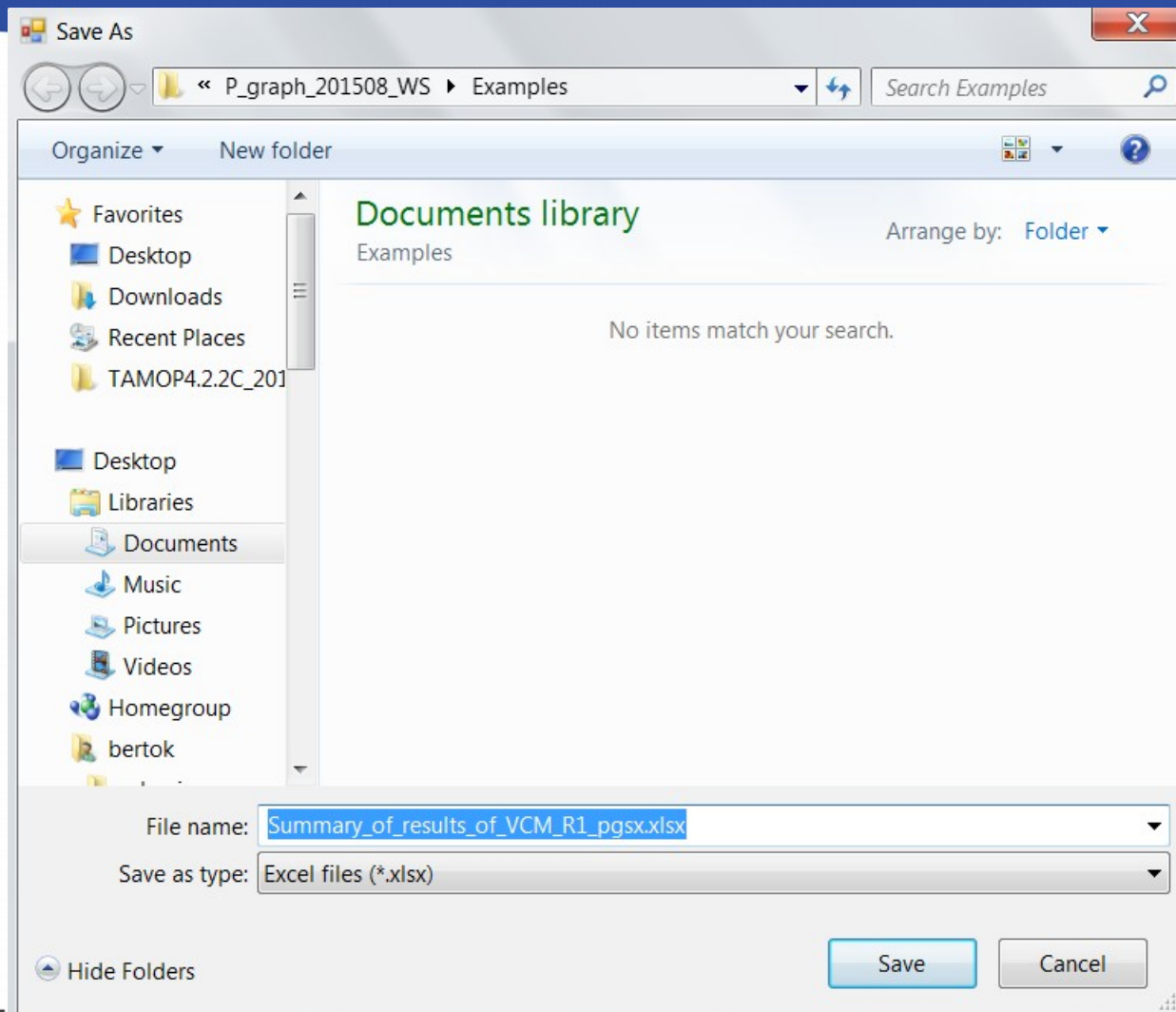
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Reaction-Network Synthesis for VCM: Save the Excel file

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Reaction-Network Synthesis for VCM: Overview Feasible Networks in Excel

Solution structures	Raw materials			Products	Operating units			Cost [EUR/y]
	C ₂ H ₄ [t/y]	Cl ₂ [t/y]	O ₂ [t/y]	C ₂ H ₃ Cl [t/y]	Chloration	Oxychloration	Pyrolysis	
Structure1	-2,00	-1,00	-0,50	2,00	1,00	1,00	2,00	0,00
Structure2	-2,00	-2,00		2,00	2,00		2,00	0,00

Reaction-Network Synthesis for VCM: Add HCl feed as additional option

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

P-Graph Studio (VCM_R2.pgxsx) Solver: Offline

File Edit View Preferences Help

Object Properties TreeView Solutions

Object Properties

- Parameters
 - Type: Raw Material
 - Name: **HCl_raw**
 - Price: 0 EUR/y
 - Req. flow: 0 t/y
 - Max. flow: 1000000000 t/y
 - Quantity Type: Mass
 - Measurement Unit: ton (t)
 - Price unit: EUR/y
 - Comment:
- Style
 - Node:
 - Label:
 - Comment:
 - Parameters:

Quick View

Algorithm: ABB Mutual exclusions Solve problem bertok / Logout

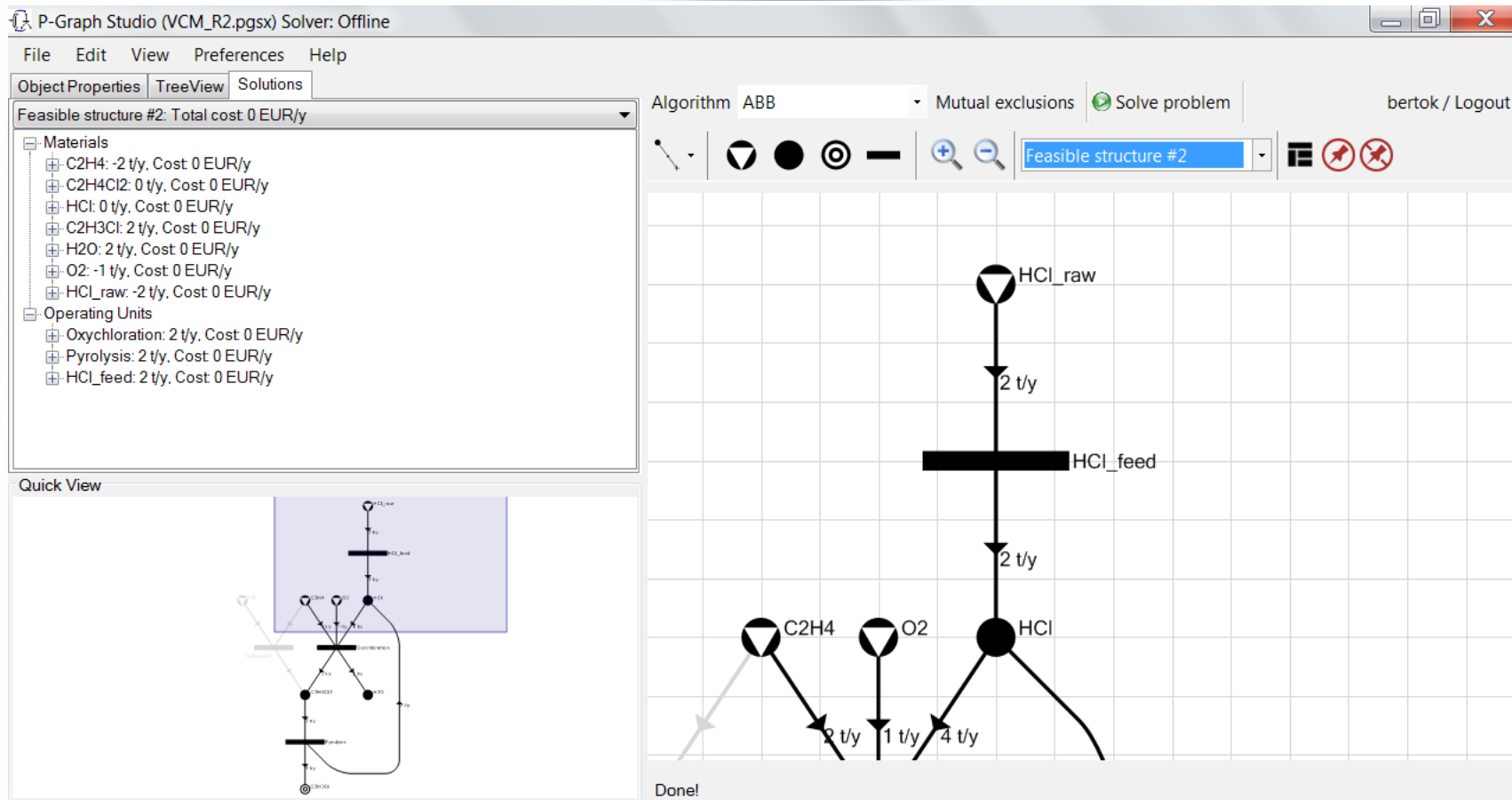
Original Problem

Done!

Reaction-Network Synthesis for VCM: HCl feed in additional feasible network

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



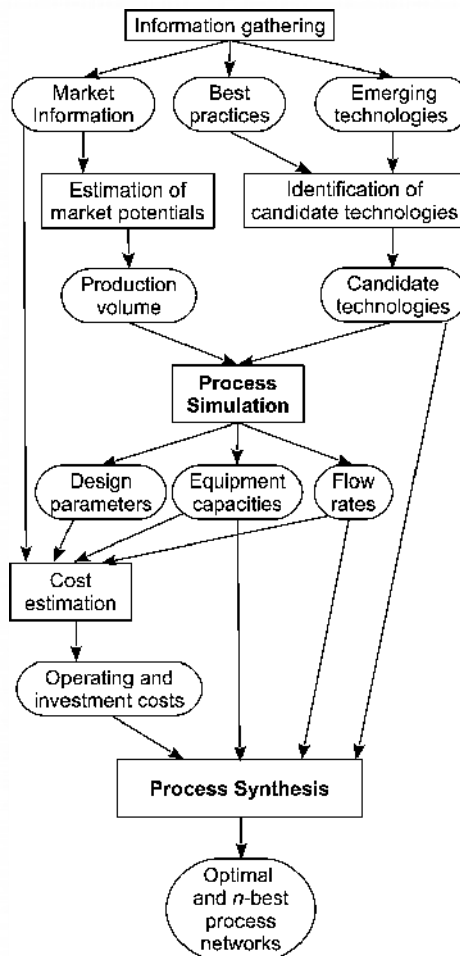
Reaction-Network Synthesis for VCM: additional feasible network in Excel

Solution structures	Raw materials				Products	Operating units				Cost [EUR/y]
	C ₂ H ₄ [t/y]	Cl ₂ [t/y]	O ₂ [t/y]	HCl _{raw} [t/y]	C ₂ H ₃ Cl [t/y]	Chloration	Oxychloration	Pyrolysis	HCl _{feed}	
Structure1	-2,00	-2,00			2,00	2,00		2,00		0,00
Structure2	-2,00		-1,00	-2,00	2,00		2,00	2,00	2,00	0,00
Structure3	-2,00	-1,00	-0,50		2,00	1,00	1,00	2,00		0,00

Computer Aided Process-Network Synthesis: Overview

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

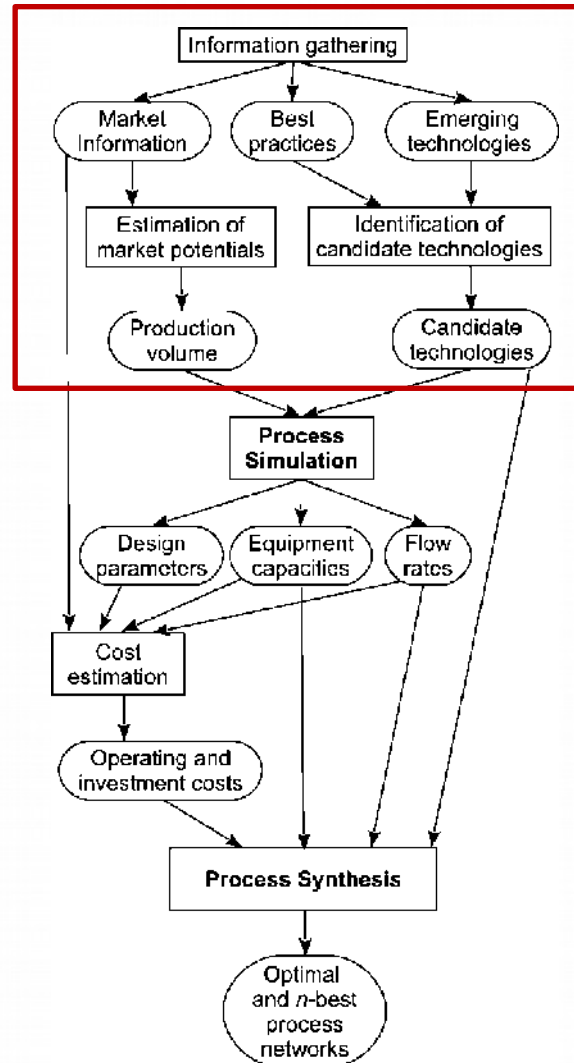
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Identification of Candidate Technologies

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



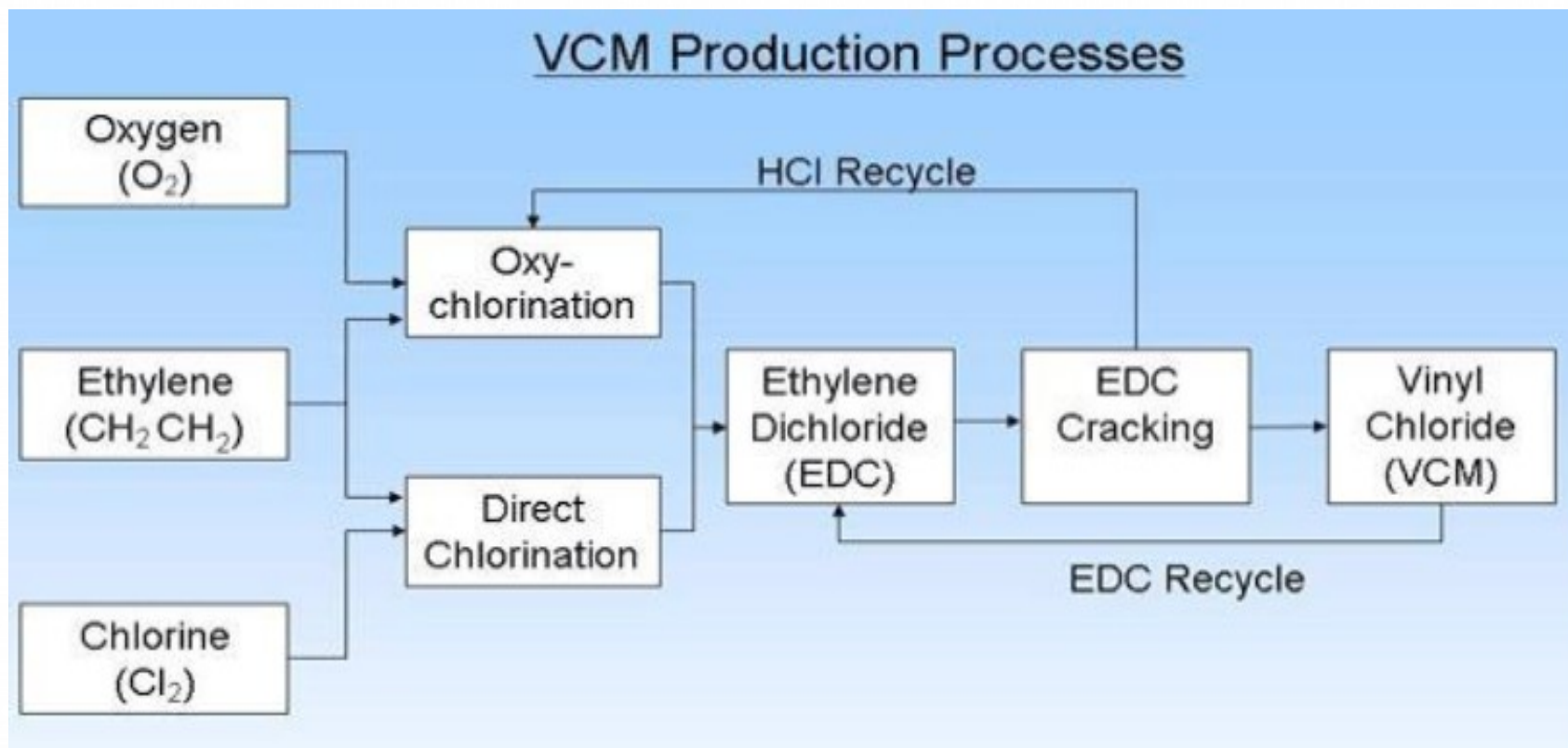
Technologies for VCM Production

- Vinyl chloride currently is produced almost exclusively by the balanced process from the conversion of ethylene, chlorine and oxygen.
- In the manufacture of vinyl chloride using the balanced process, the hydrogen chloride generated in the pyrolysis reactor is totally consumed in the oxychlorination reactor to which it is recycled.
- Each reacting unit is accompanied by one or possibly more separating units for removing the byproducts, recycling the hydrogen chloride or purifying the final product.

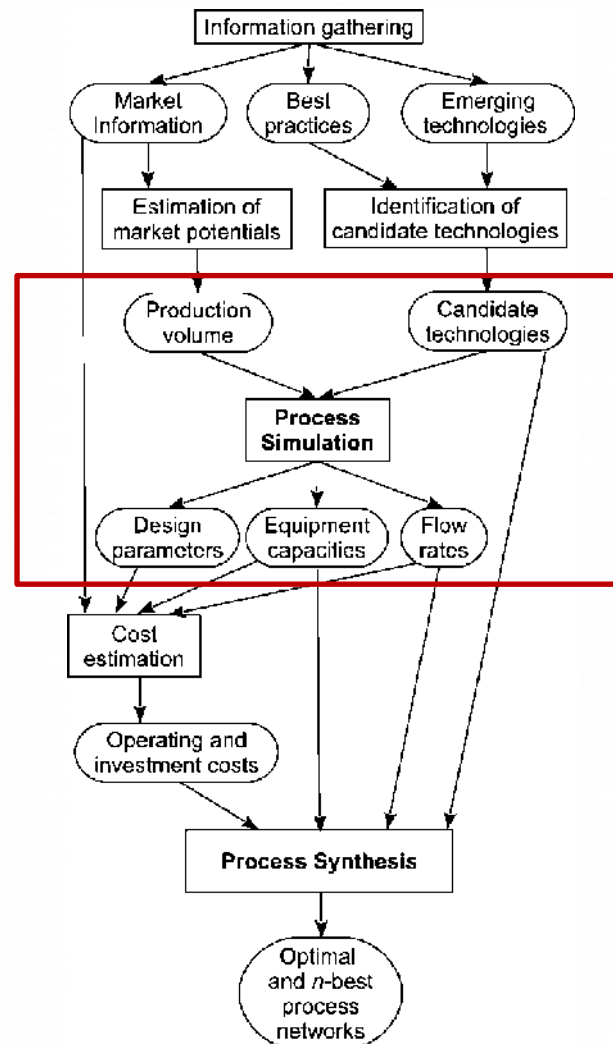
Technologies for VCM Production

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



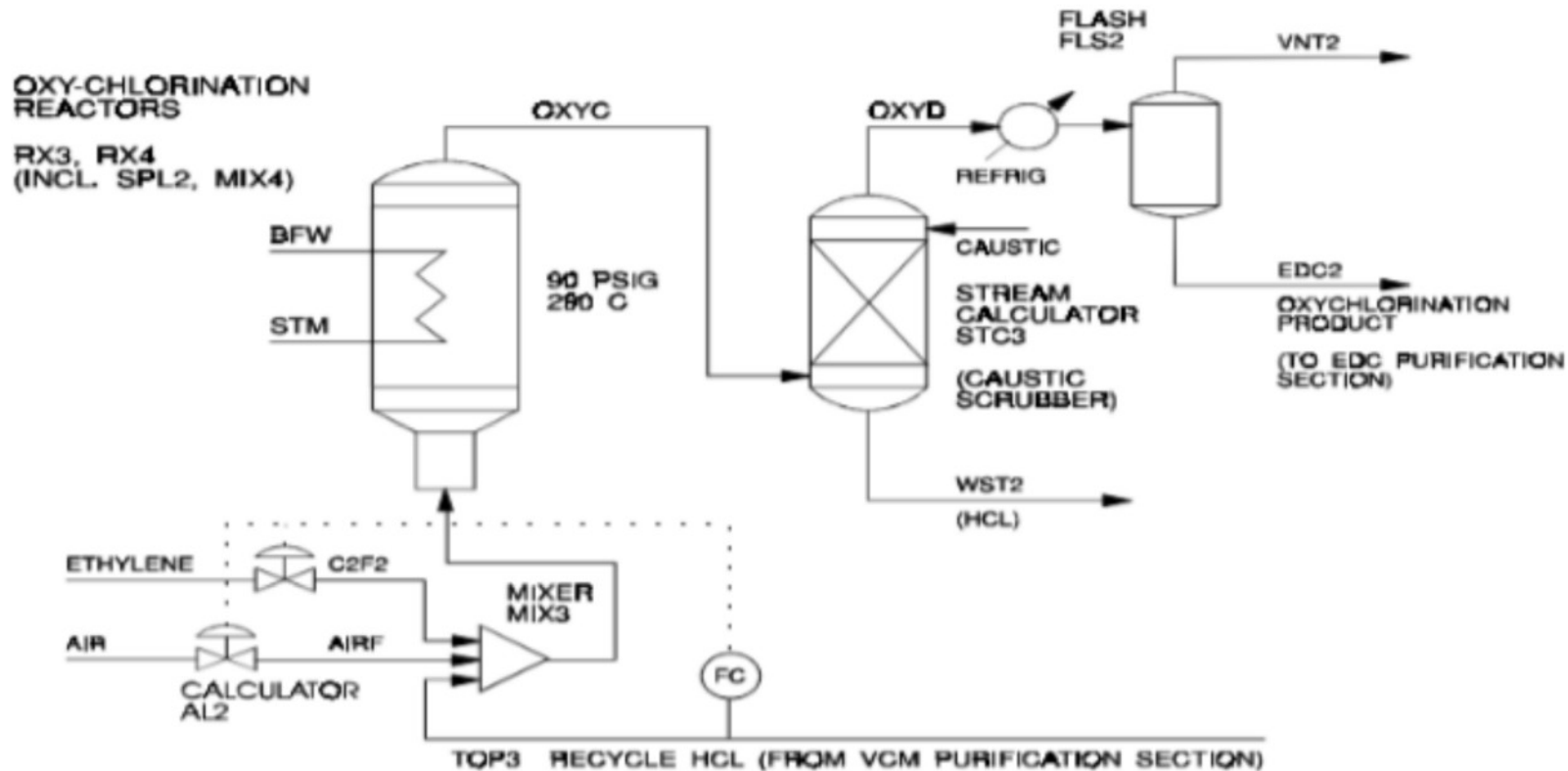
Process Simulation



Process Simulation in Aspen: Flowsheet

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Process Simulation: Aspen report

RATE PARAMETERS:

REACTION NO	PREEXP. FACTOR	ACT. ENERGY J/KMOL	TEMP. EXPONENT	REF. TEMP K
1	132.00	0.	0.	
2	0.61200E-05	0.	0.	

POWERLAW EXPONENTS:

REACTION NUMBER:	1			
SUBSTREAM:	MIXED			
C2H4	1.0000	CL2	1.0000	
REACTION NUMBER:	2			
SUBSTREAM:	MIXED			
CL2	1.0000	EDC	1.0000	

*** RESULTS ***

REACTOR HEAT DUTY	WATT	-0.22789E+07
REACTOR VOLUME	CUM	11.974



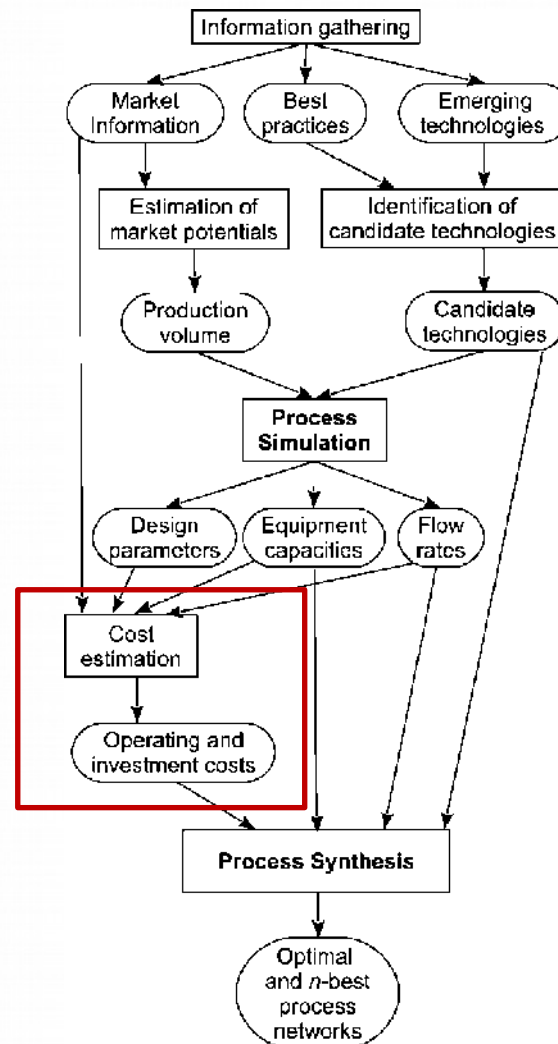
Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Cost Estimation

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Cost Estimation: Physical Data

Se11	condenser		reboyley		diameter		height		number of trays (theoretical)
Lights column	-12 kw		228,7 kw		0,54 m		7,4 m		10
	342 K		359 K		21,26 in		24,28 ft		
	155,9 F		186,5 F		1/2 size				20
	temp.		temp.		15,0329 in				practical
Se12	condenser		reboyley		diameter		height		number of trays (theoretical)
Heavies column	-2823 kw		2823 kw		1,75 m		15,4 m		20
	360 K		362 K		68,90 in		50,52 ft		
	188,3 F		191,9 F		1/2 size				40
	temp.		temp.		48,7179				practical
Se31	condenser		reboyley		diameter		height		number of trays (theoretical)
HCl column	-2685 kw		305 kw		1,13 m		11,4 m		15
	272 K		414 K		44,49 in		37,40 ft		
	29,9 F		285,5 F		1/2 size				30
	temp.		temp.		31,4578				practical

Cost Estimation Software

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Sample Projects (Gas Plant) - Aspen Capital Cost Estimator V8.7.1 (1st Qtr 2014 Pricing Basis) - aspenONE - [Power Distribution]

File Run View Tools Window Help

All components

Project Basis (** not for Pig...)

- Project Properties
 - General Project Data
 - Basis for Capital Costs
 - Input Units of Measure
 - Output (Reports) Units
 - Design Basis
 - Equipment Specifications
 - Piping Specs
 - General
 - Material
 - Custom
 - Civil/Steel Spec
 - Instrumentation
 - Electrical Specs
 - Insulation Spec
 - Paint Specs
 - Currency
 - Contingency and Escalation
 - Engineering Work
 - By Phase
 - By Discipline
 - Drawing Types
 - Drawing Count
 - Construction Work
 - Wage Rates
 - Crew Mixes
 - Craft Names
 - Codes of Accounts
 - Indexing
 - Equipment Rental Systems
 - Power Distribution
 - Process Control
 - Panel Board
 - Contracts
 - Contracts
 - Scope (**)

Project

- Line 1 (Line 1)
 - The main SS (Main 1)
 - Unit SS 01 (Unit 10)
 - Text (Unit 11)
 - Ops center 1 (OPS 1)
 - Cell center 1 (CTL 1)
 - Absorption area (OPEN 1.1)
 - Unit SS 02 (Unit 20)
 - Reaction area (OPEN 1.2)
 - Utility & miscellaneous (GRADE 1.3)
 - Offsites (GRADE 2.1)

Unit Substation

OK Cancel Print

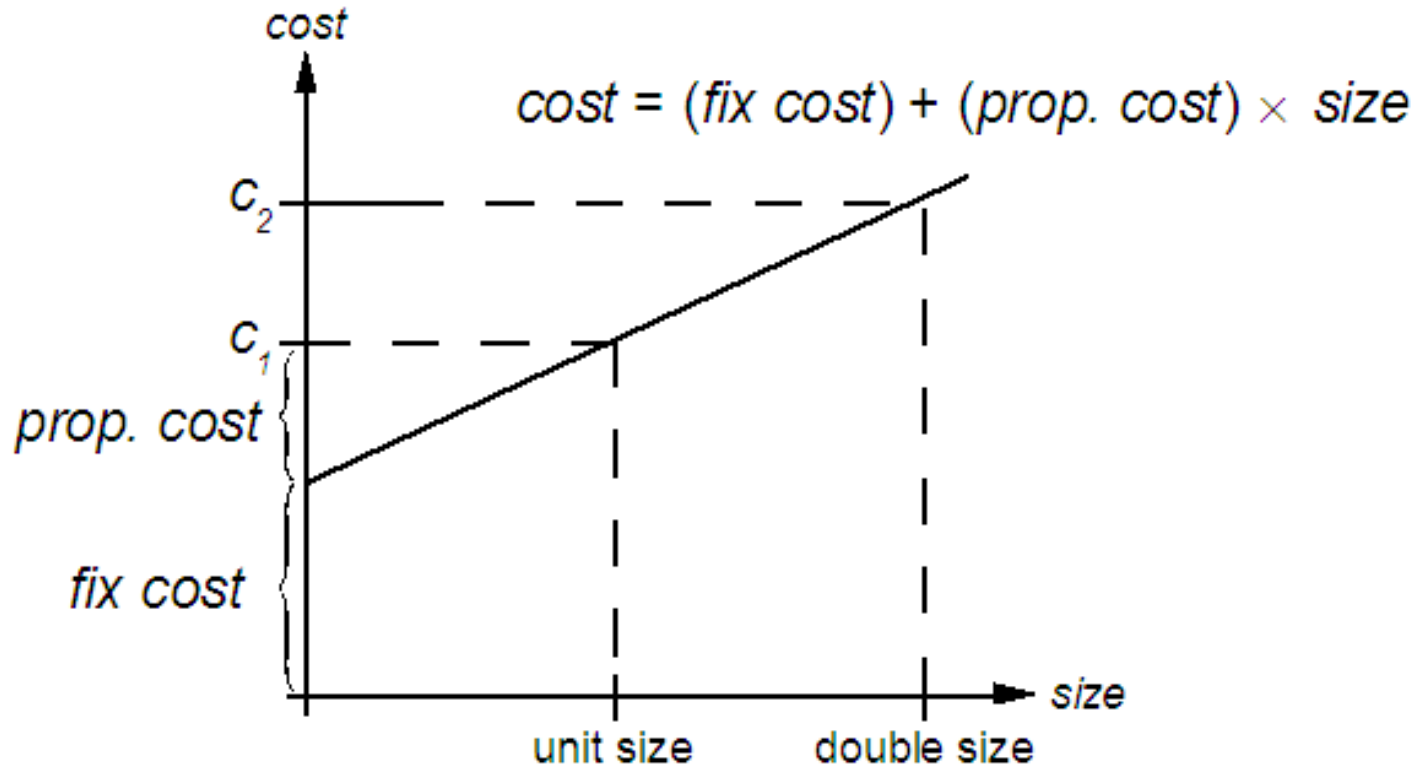
Name	Units	Item 1	Item 2	Item 3
Substation description		Test		
Contractor set (CONSET) number		F	F	F
Supply voltage	KV			
Delivery voltage	KV			
Transformer tapping		C	C	C
Distribution system		SPOT	SPOT	SPOT
Demand diversity factor		8	8	8
Power factor		9	9	9
Excess capacity	PERCENT	20	20	20
Cable/wire type				
Cable placement				
Distance to supply	FEET			
Required capacity	KVA			
Distance transformer switchgear	FEET			
Conductor type				
Transformer required				
Switchgear required				
Motor control center required				
Main breaker rating	A			
Feeder breaker rating	A			
Number of feeder breakers				
Chill foundation required				
Grounding (well,grid) required				

Ready

Estimate Fixed and Proportional Cost

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

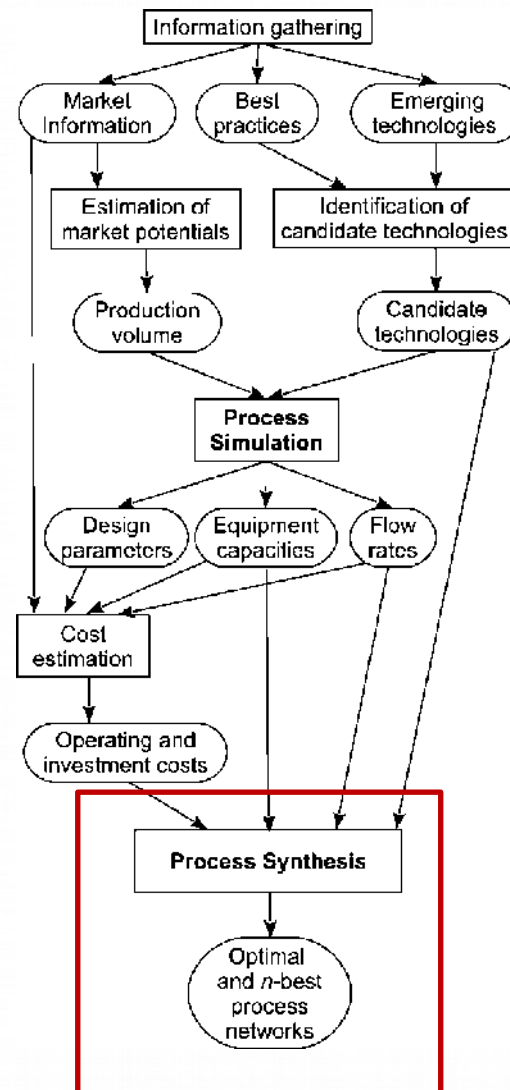
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Estimated Cost Parameters

Operating unit	Cost			Total:		Fixed cost	Proportional cost
Se11	Investment:	52605	\$	17535	\$/year	34165	18440
	1/2 size:	43385	\$				
	Operating:			52934	\$/year		
	cooling:	242	\$/year				
	heating:	52692	\$/year				
				70469	\$/year		
Se12	Investment:	226728	\$	75576	\$/year	91344	135384
	1/2 size:	159036	\$				
	Operating:			707331	\$/year		
	cooling:	56912	\$/year				
	heating:	650419	\$/year				
				782907	\$/year		
Se31	Investment:	159859	\$	53286	\$/year	57383	102476
	1/2 size:	108621	\$				
	Operating:			124402	\$/year		
	cooling:	54130	\$/year				
	heating:	70272	\$/year				
				177688	\$/year		

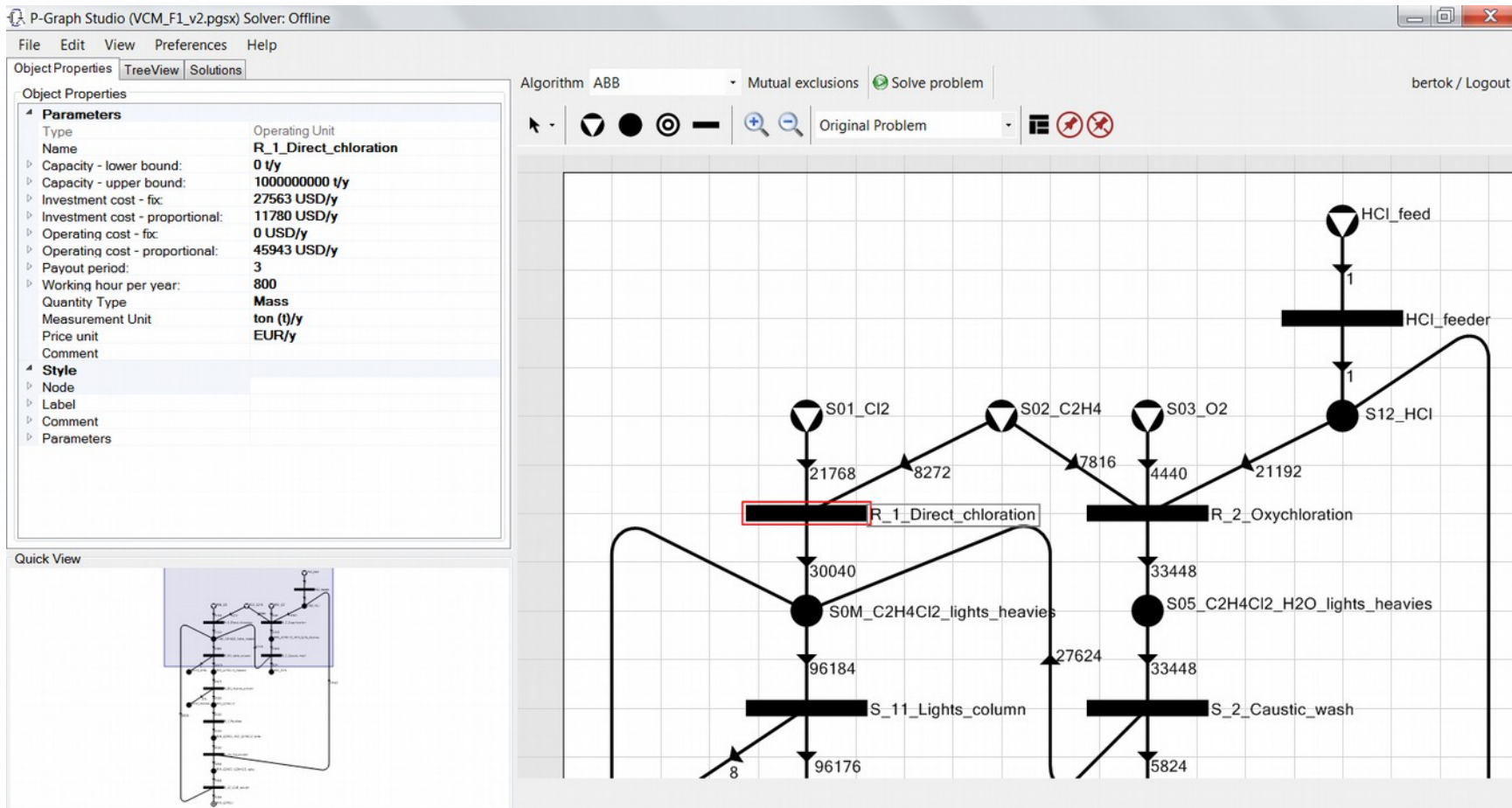
Process Synthesis



Cost Parameters in P-graph Studio

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Cost Parameters in P-graph Studio

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Object Properties	
Object Properties	
Parameters	
Type	Operating Unit
Name	R_1_Direct_chloration
Capacity - lower bound:	0 t/y
Capacity - upper bound:	1000000000 t/y
Investment cost - fix:	27563 USD/y
Investment cost - proportional:	11780 USD/y
Operating cost - fix:	0 USD/y
Operating cost - proportional:	45943 USD/y
Payout period:	3
Working hour per year:	800
Quantity Type	Mass
Measurement Unit	ton (t)/y
Price unit	EUR/y
Comment	
Style	
Node	
Label	
Comment	
Parameters	



The Best Networks by Algorithm ABB

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Object Properties | TreeView | Solutions

Feasible structure #1: Total cost -2008170 EUR/y
Maximal Structure: Total cost 0 EUR/y
Feasible structure #1: Total cost -2008170 EUR/y
Feasible structure #2: Total cost -1794970 EUR/y
Feasible structure #3: Total cost 1610320 EUR/y

Algorithm ABB

- ⊕ S05_C2H4Cl2: 176 t/y, Cost -122100 EUR/y
- ⊕ S0M_C2H4Cl2_lights_heavies: 0 t/y, Cost 0 EUR/y
- ⊕ S15_C2H4Cl2_heavies: 0 t/y, Cost 0 EUR/y
- ⊕ S091_lights: 8 t/y, Cost 0 EUR/y
- ⊕ S10_C2H4Cl2: 0 t/y, Cost 0 EUR/y
- ⊕ S092_heavies: 176 t/y, Cost 0 EUR/y
- ⊕ S11_C2H3Cl_HCl_C2H4Cl2_lights: 0 t/y, Cost 0 EUR/y
- ⊕ S16_C2H3Cl_C2H4Cl2_lights: 0 t/y, Cost 0 EUR/y
- ⊕ S12_HCl: 0 t/y, Cost 0 EUR/y
- ⊕ S14_C2H3Cl: 36288 t/y, Cost -16779600 EUR/y
- ⊕ S05_C2H4Cl2_H2O_lights_heavies: 0 t/y, Cost 0 EUR/y
- ⊕ S07_H2O: 5824 t/y, Cost 0 EUR/y
- Operating Units
 - ⊕ R_1_Direct_chloration: 1 t/y, Cost 45959,4 EUR/y
 - ⊕ S_11_Lights_column: 1 t/y, Cost 52936,2 EUR/y
 - ⊕ S_12_Heavies_column: 1 t/y, Cost 707340 EUR/y
 - ⊕ R_3_Pyrolisis: 1 t/y, Cost 791219 EUR/y
 - ⊕ S_31_HCl_column: 1 t/y, Cost 124409 EUR/y
 - ⊕ S_32_VCM_column: 1 t/y, Cost 80809,7 EUR/y
 - ⊕ R_2_Oxychloration: 1 t/y, Cost 49110,2 EUR/y
 - ⊕ S_2_Caustic_wash: 1 t/y, Cost 1,61025 EUR/y



Practice: Example Butanol

- Take into account the lists of candidate material streams and operating units given in Tables 1, 2, 3, and 4 for separating fermentation broth into butanol, ethanol, and acetone.
- Determine the optimal and second best structure producing 10,660 kg butanol pro hour if the payout period is five years (2000 working hours a year).

Practice (cont'd)

Table 1: List of material streams

ID	Description	Composition				
		Acetone	Ethanol	Water	Butanol	Ethyl-Hexanol
F	Fermentation broth (Raw material)	0.6%	0.2%	97.7%	1.5%	
A	Acetone (Product)	100.0%				
E	Ethanol (Product)		100.0%			
B	Butanol (Product)				100.0%	
X	Ethyl-Hexanol					100.0%
I1	Intermediate	14.7%	4.0%	46.6%	34.7%	
I2	Intermediate	0.4%	0.1%		1.3%	98.2%
I3	Intermediate	20.0%	5.7%		74.3%	
W1	Waste Water		0.1%	99.8%	0.1%	
W2	Waste Water	0.2%	0.1%	99.6%	0.1%	
W3	Waste Water	10.0%	2.5%	87.5%		

Practice (cont'd)

Table 2: List of operating units

	Name	Description
o_1	GasStrip	Gas Stripping Unit
o_2	Extract	Extracting Unit
o_3	SolventStrip	Solvent Stripping Unit
o_4	Adsorp	Adsorbing Unit
o_5	Distill1	Distilling Unit
o_6	Distill2	Distilling Unit

Table 3: Table of inlet and outlet streams

Name	Inlet Streams [kg/h]	Outlet Streams [kg/h]
GasStrip	F (744 150)	W1 (713 400), I1 (30 750)
Extract	F (744 150), X (800 320)	W2 (729 800), I2 (814 670)
SolventStrip	I2 (814 670)	X (800 320), I3 (14 350)
Adsorp	I1 (30 750)	I3 (14 350), W3 (16 400)
Distill1	I3 (14 350)	A (2 870), E(820), B(10 660)
Distill2	I3 (14 350)	A (2 870), E(820), B(10 660)

Practice (cont'd)

- For simplicity, consider investment cost as fixed and operating cost as proportional to the load.

Table 4: Table of costs

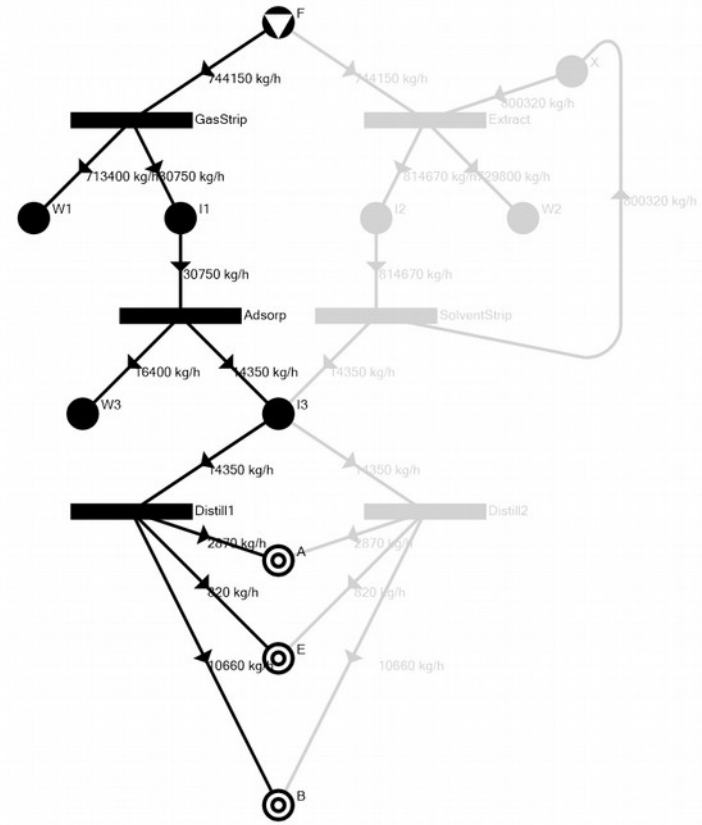
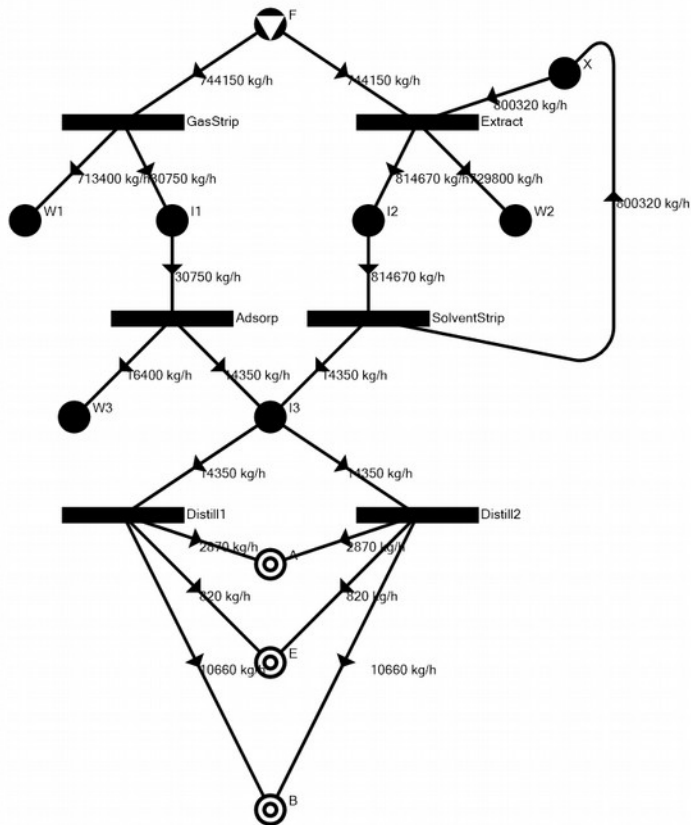
Name	Investment Cost [1000 US\$/year]	Operating Cost [1000 US\$/year]
GasStrip	2180	871
Extract	1189	5231
SolventStrip	1914	864
Adsorp	3806	132
Distill1	3124	1246
Distill2	4156	1658

P-graph example: Butanol

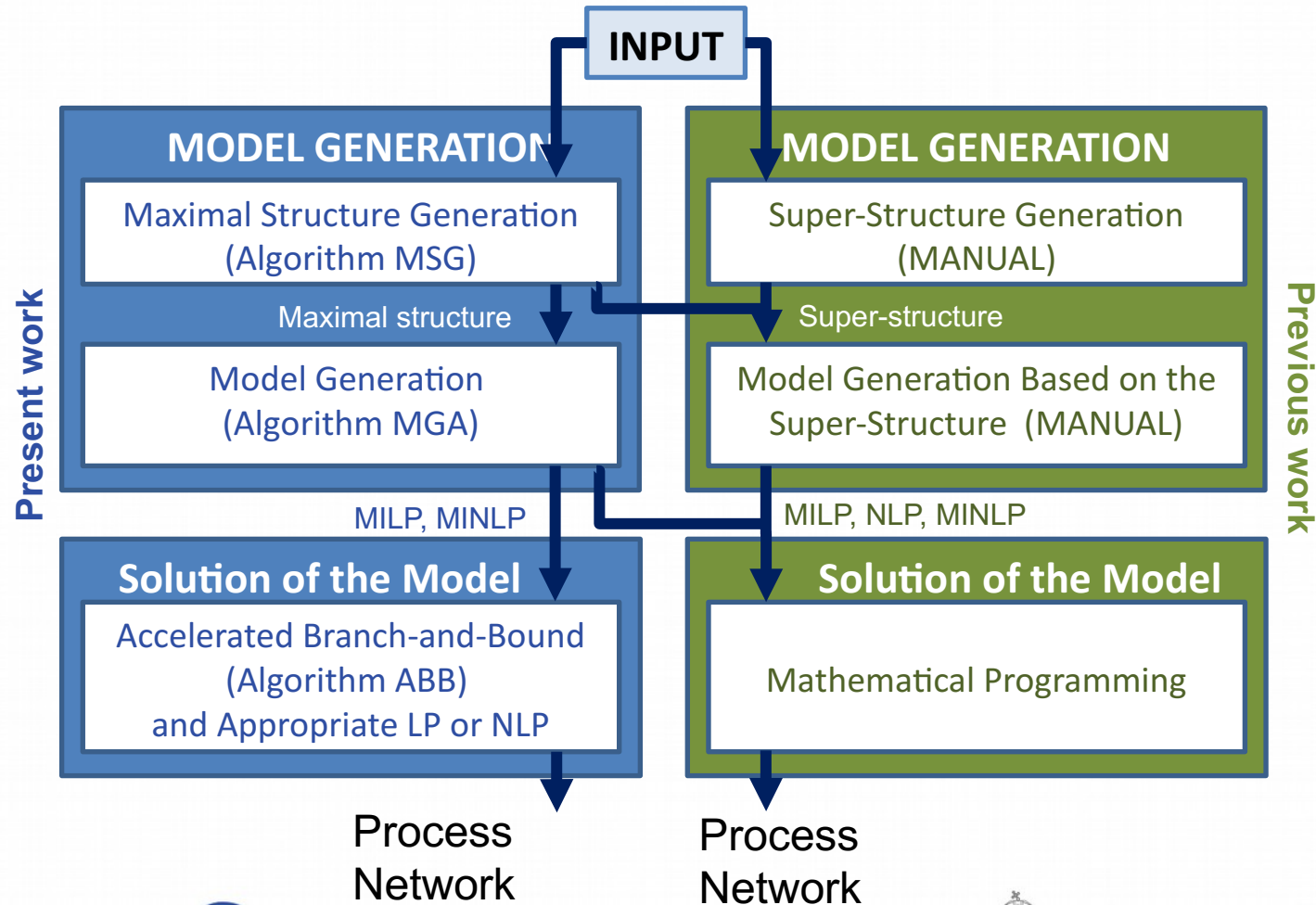
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- Maximal structure

1st solution: 2035,5 \$



Process Network Synthesis



V. Supply-chain modeling by P-graphs

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Introduction

V.1 Resource allocation

V.2 Infeasible and unbounded models

V.3 Multiperiod resource allocation

V.4 Network models

V.1 Resource allocation

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Example 1.1

- A weekly resource allocation problem for the production manager of Ajax Computer Company
- Ajax sells three types of computers
 - Desktop computer (Alpha) – \$350
 - Laptop (Beta) – \$470
 - Workstation (Gamma) – \$610
- We assume that all production during the week can and will be sold immediately

Example 1.1 (Cont'd)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- Two test equipment
 - A-line (Alpha and Beta) – 120 hours/week, 1 hour/PC
 - C-line (Gamma) – 48 hours/week, 1 hour/PC
- Human resource
 - Alfa – 10 labor-hours/PC
 - Beta – 15 labor-hours/PC
 - Gamma – 20 labor-hours/PC

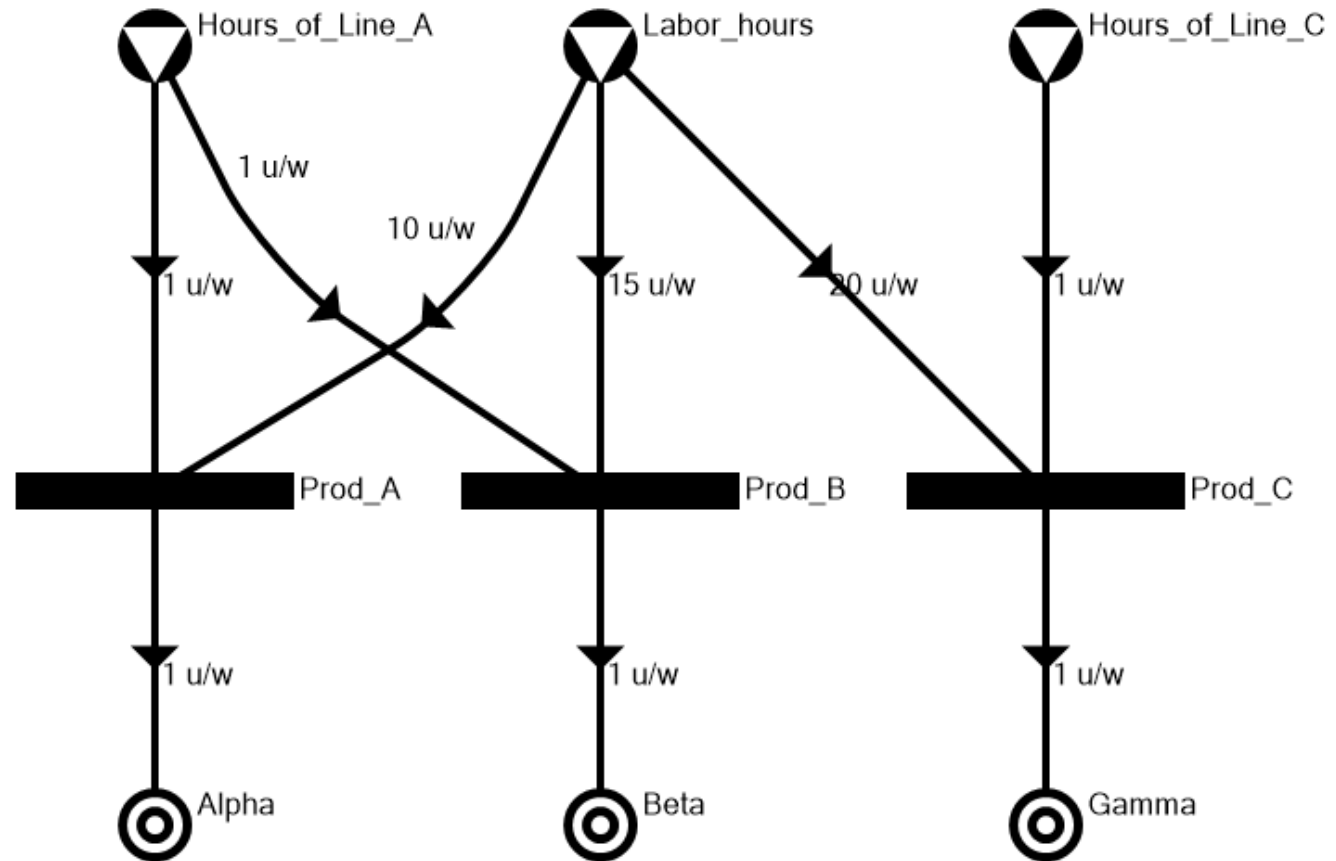
Decision variables

- M_A : number of Alphas to be assembled during the week
- M_B : number of Betas to be assembled during the week
- M_C : number of Gammas to be assembled during the week

Linear Programming Model

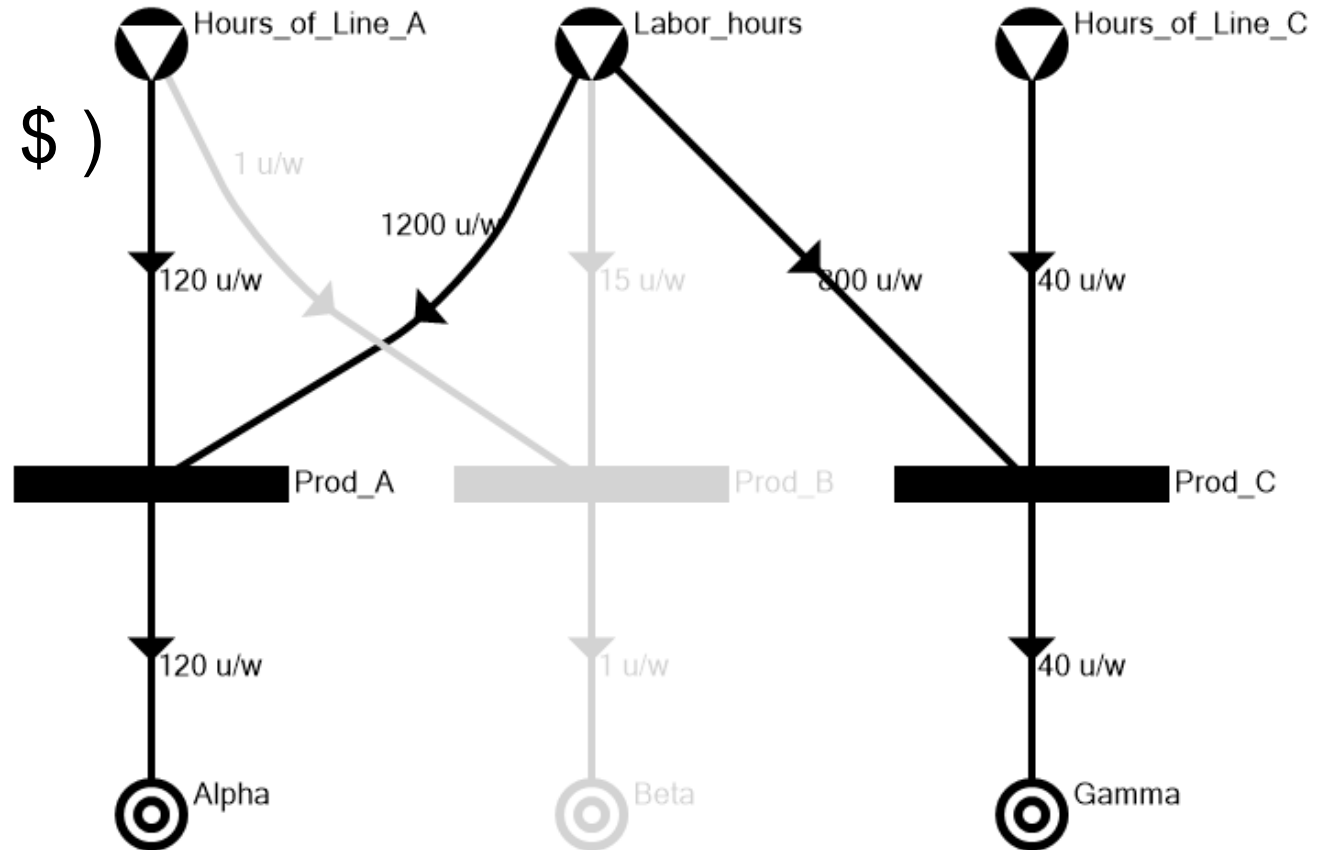
- Objective function
 - $\text{Max } Z = 350M_A + 470M_B + 610M_C$
- Constraints
 - $M_A + M_B \leq 120$
 - $M_C \leq 48$
 - $10M_A + 15M_B + 20M_C \leq 2000$

P-graph Model



Best Network

Cost: -66400 \$
(Profit: +66400 \$)



Optimal Values of Decision Variables

- $Z^* = \$66,400$
 - $M_A^* = 120$
 - $M_B^* = 0$
 - $M_C^* = 40$
-
- Labor availability is satisfied as equation
 - A-line test capacity constraint is satisfied as equation
 - C-line test capacity constraint is satisfied as a strict inequality
 - It has free capacity

Example 1.2

- Assume that Alphas can also be tested on the C-line test equipment
 - 1.5 hours/PC
- New decision variables
 - M_{A1} : number of Alphas to be assembled during the week and tested on A-line
 - M_{A2} : number of Alphas to be assembled during the week and tested on C-line

Linear Programming Model

$$\max Z = 350M_A + 470M_B + 610M_C$$

s.t.

$$M_{A1} + M_B \leq 120$$

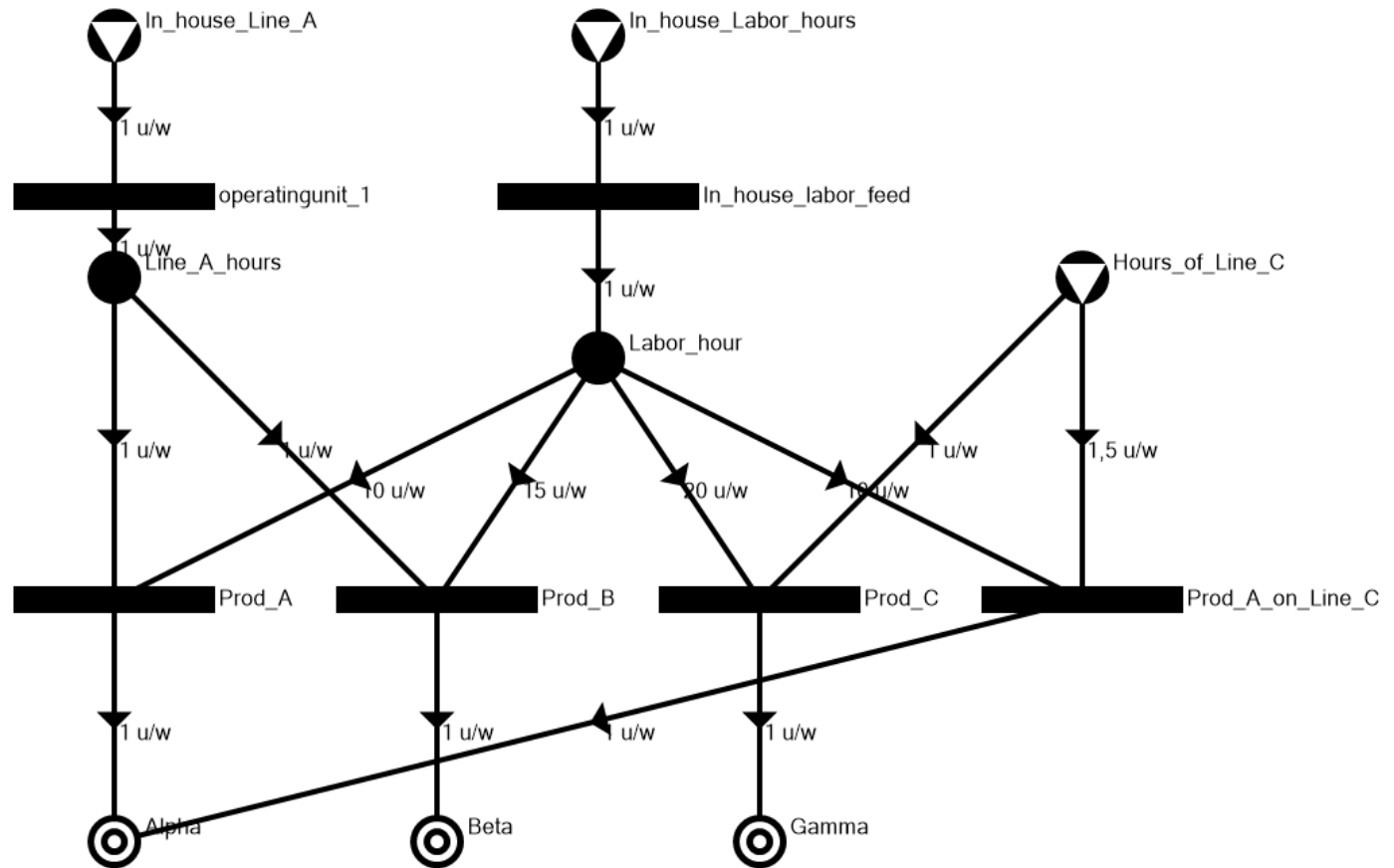
$$1.5M_{A2} + M_C \leq 48$$

$$10M_{A1} + 10M_{A2} + 15M_B + 20M_C \leq 2000$$

$$M_A - M_{A1} - M_{A2} = 0$$

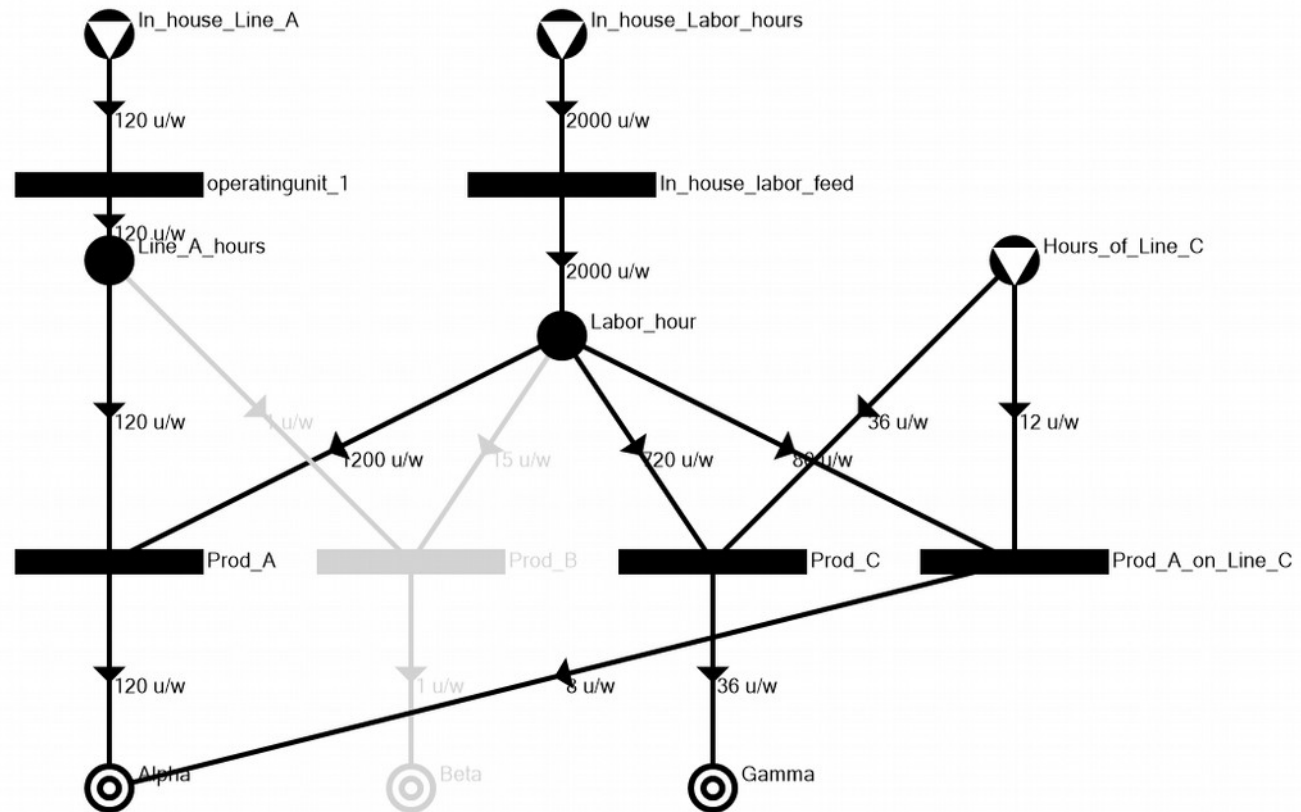
$$M_A, M_{A1}, M_{A2}, M_B, M_C \geq 0$$

P-graph Model



Optimal Network

Cost: -66760 \$
(Profit: 66760 \$)



Optimal Values of Decision Variables

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- $Z^* = \$66,760$
- $M_A^* = 128$
- $M_{A1}^* = 120$
- $M_{A2}^* = 8$
- $M_B^* = 0$
- $M_C^* = 36$

V.2 Infeasible and unbounded models

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Infeasibility

- The model is infeasible if there are no feasible solutions
 - For example, if a constraint requiring at least 50 Gammas for a week when the C-line capacity is 48
- The model is feasible but the objective function can be unbounded

Example 1.3

- Suppose that Ajax
 - Can outsource A-line testing equipment at \$40/hour in unlimited quantities
 - Can hire additional labor at \$30/hour in unlimited quantities

Linear Programming Model

- New decision variables
 - E_A : quantity of outsourced A-line test hours
 - E_L : quantity of rented labor hours
- Modified constraints
 - $M_A + M_B \leq 120 + E_A$
 - $10M_A + 15M_B + 20M_C \leq 2000 + E_L$

Optimal Values of Decision Variables

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- Because the net profit for each Alpha is \$350 but would only cost \$340 using extra resources, Ajax can achieve an unbounded net revenue
- This situation of "buying low and selling high" to make an unbounded profit is called arbitrage by finance theorists
- Marketing and sales department could not sell an unlimited number of Alphas
- Production managers would be limited the extra A-line capacity and labor

V.3 Multiperiod resource allocation

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Introduction

- SC planning is a dynamic process because decisions made in this period are linked to decisions that will be made in later periods
- For example, inventories of raw materials, intermediate products and finished goods play a central role in optimization

Example 1.4

- High level decisions
 - The organization can sell 120 units of Alphas next week (see example 3.1) → Beta must be included in Ajax's production line
 - Sales forecast in 4 weeks time horizon (R_{nt}, A_{pt})

	Week 1	Week 2	Week 3	Week 4
Alpha	[20, 60]	[20, 80]	[20, 120]	[20, 140]
Beta	[20, 40]	[20, 40]	[20, 40]	[20, 40]
Gamma	[20, 50]	[20, 40]	[20, 30]	[20, 70]

Decisions

- In each week for each product
 - How much to produce?
 - How much to sell?
 - How much to store in inventory?
- Decision variables
 - M_{pt} : assembly and testing of product p in week t
 - S_{pt} : sales of product p in week t
 - I_{pt} : inventory of product p at the end of the week t
(or inventory at the beginning of week $t + 1$)

Sales

- The sales of each product is more than the minimal and less than the maximal value

$$- R_{pt} \leq S_{pt} \leq A_{pt}$$

Inventory data

- Carrying costs
 - Alpha : \$9/week
 - Beta : \$10/week
 - Gamma : \$18/week
- Initial inventory
 - Alpha : 22 (I_{A0})
 - Beta : 42 (I_{B0})
 - Gamma : 36 (I_{C0})

Inventory

- The following balance equations are satisfying for each week
 - Ending inventory in week t =
ending inventory in week $t - 1$ +
production in week t – sales in week t
 - $I_{pt} = I_{p,t-1} + M_{pt} - S_{pt}$

LP Model

$$\max Z = 350(S_{A1} + S_{A2} + S_{A3} + S_{A4}) + 470(S_{B1} + S_{B2} + S_{B3} + S_{B4}) + 610(S_{C1} + S_{C2} + S_{C3} + S_{C4}) - 9(I_{A1} + I_{A2} + I_{A3} + I_{A4}) - 10(I_{B1} + I_{B2} + I_{B3} + I_{B4}) - 18(I_{C1} + I_{C2} + I_{C3} + I_{C4})$$

s.t.

$$M_{At} + M_{Bt} \leq 120 \quad (t = 1, 2, 3, 4)$$

$$M_{Ct} \leq 48 \quad (t = 1, 2, 3, 4)$$

$$10M_{At} + 15M_{Bt} + 20M_{Ct} \leq 2000 \quad (t = 1, 2, 3, 4)$$

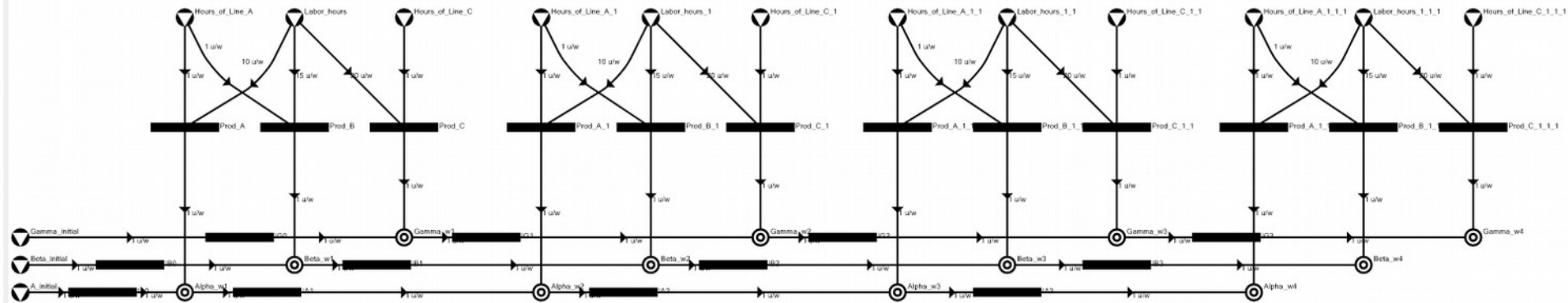
$$I_{pt} = I_{p,t-1} + M_{pt} - S_{pt} \quad (t = 1, 2, 3, 4; p = A, B, C)$$

$$M_{At}, M_{Bt}, M_{Ct} \geq 0 \quad (t = 1, 2, 3, 4)$$

$$R_{pt} \leq S_{pt} \leq A_{pt} \quad (t = 1, 2, 3, 4; p = A, B, C)$$

P-graph Model

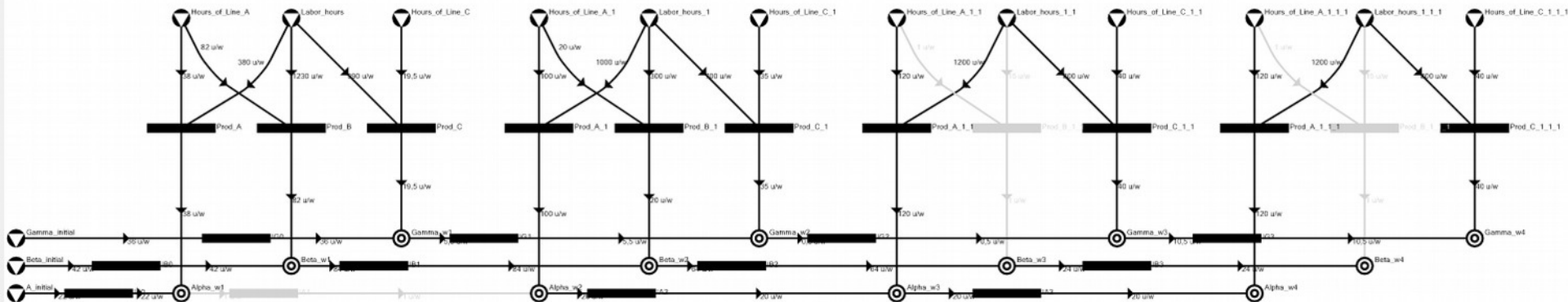
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Optimal Network

Cost: -309308 \$

(== Profit: +309308 \$)



Rolling Horizon

- The danger is the sales will not match expectations and cause inventories to build up
 - The forecast is too optimistic
- The danger can be reduced by employing the model on a rolling horizon base
 - At the beginning of each week, we reoptimize the model with new forecast based on the current sales

V.4 Network models

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Introduction

- LP models with a mathematical structure corresponding to networks (graphs) are called network models
- Can be optimized very efficiently by tailored algorithms
- It displays a supply chain model as a network which is very useful for communication purpose

Example 1.5

- Transportation data of Alpha computers
 - Plant at Chicago (100 units of Alpha)
 - Warehouse in St. Louis (45 units of Alpha)
 - 8 markets

j = From\to	1 CHI	2 STL	3 DET	4 CIN	5 LOU	6 IND	7 MIL	8 MIN
Plant	14.00	24.00	21.00	20.00	21.50	19.00	17.00	30.00
Warehouse	24.00	15.00	28.00	20.00	18.50	19.50	24.00	28.00
Demand	22	14	18	17	15	13	15	20

\$/Alpha

Transportation

- A truck transports Alphas between two facilities
 - The first facility is a plant or a warehouse
 - The second facility is a market
 - There is no need to return to the facility
- Objective is to minimize the total transportation cost of shipping Alphas

Feasibility

- There exists a feasible solution because the total supply (145) is more than the total demand (134)
- If the supply chain is complex, it is more difficult to verify

Decision Variables

- X_{pj} : flow of Alphas from the plant to market j
- X_{wj} : flow of Alphas from the warehouse to market j

LP Model

$$\min Z = 14X_{P1} + 24X_{P2} + 21X_{P3} + 20X_{P4} + 21.5X_{P5} + 19X_{P6} + 17X_{P7} + 30X_{P8} + 24X_{W1} + 15X_{W2} + 28X_{W3} + 20X_{W4} + 18.5X_{W5} + 19.5X_{W6} + 24X_{W7} + 28X_{W8}$$

s.t.

$$X_{P1} + X_{P2} + X_{P3} + X_{P4} + X_{P5} + X_{P6} + X_{P7} + X_{P8} \leq 100$$

$$X_{W1} + X_{W2} + X_{W3} + X_{W4} + X_{W5} + X_{W6} + X_{W7} + X_{W8} \leq 45$$

$$X_{P1} + X_{W1} = 22$$

$$X_{P2} + X_{W2} = 14$$

$$X_{P3} + X_{W3} = 18$$

$$X_{P4} + X_{W4} = 17$$

$$X_{P5} + X_{W5} = 15$$

$$X_{P6} + X_{W6} = 13$$

$$X_{P7} + X_{W7} = 15$$

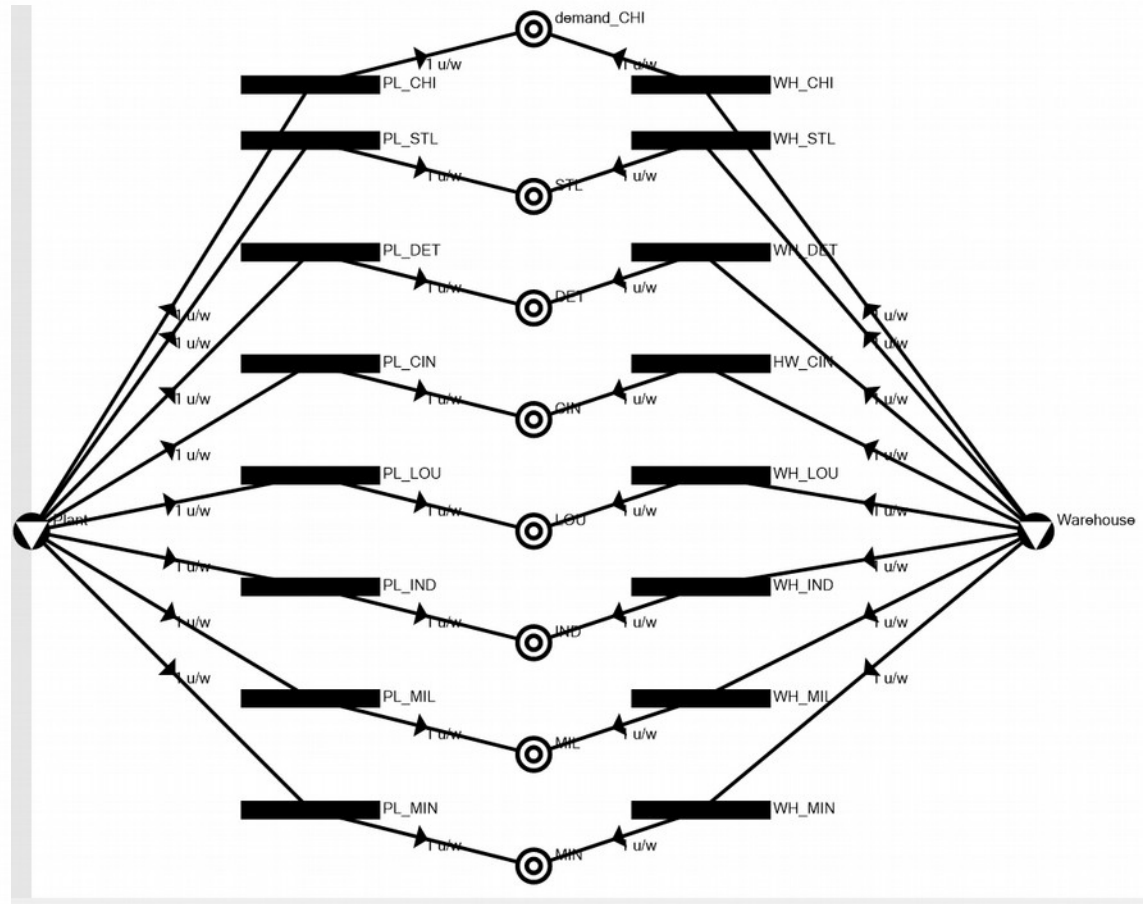
$$X_{P8} + X_{W8} = 20$$

SZÉCHENYI 2020



P-graph Model

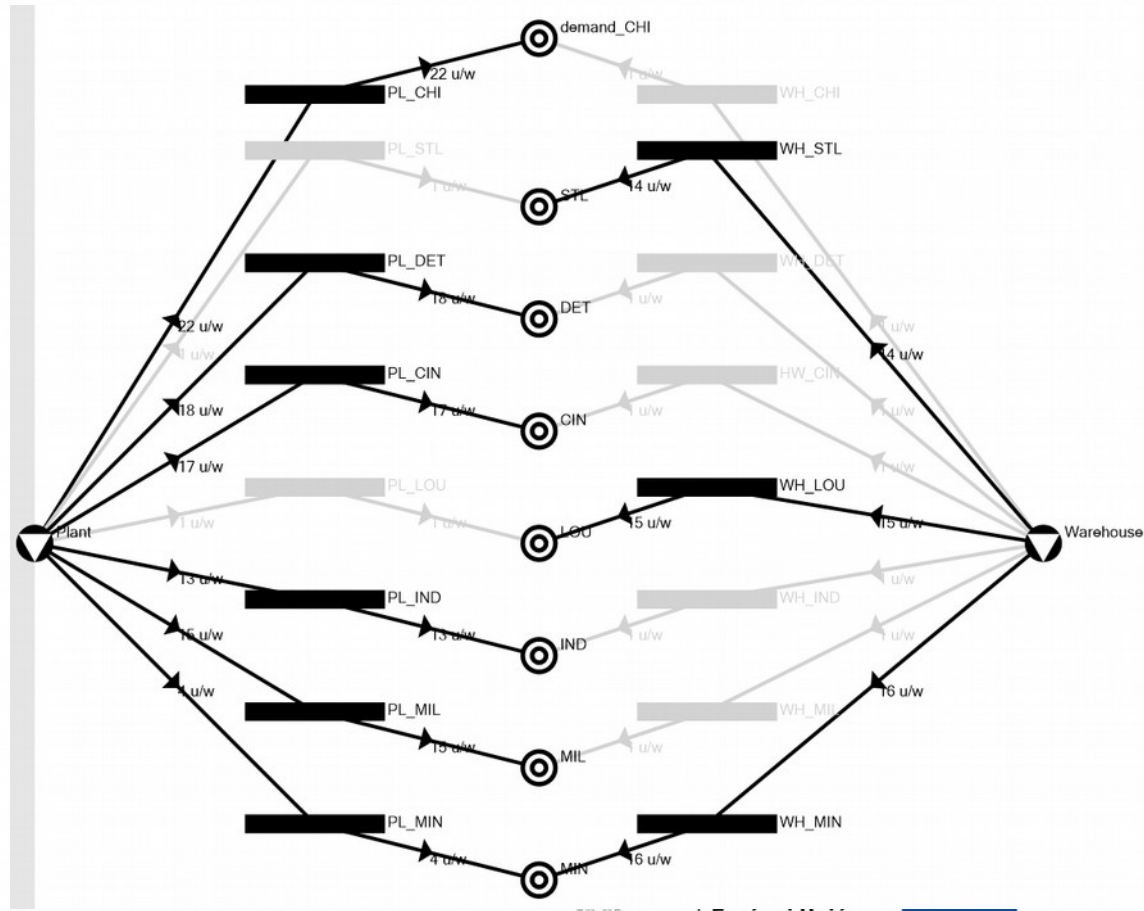
A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Optimal Netwrok

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Cost: 2583,5 \$



Optimal Values of Decision Variables

- Minimal cost \$2583.50

From/to	CHI	STL	DET	CIN	LOU	IND	MIL	MIN
Plant	22		18	17		13	15	4
Warehouse		14			15			16

VI. Time constraints in process- network synthesis and optimization

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió

Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Outline

- VI.1 Time constraints considered during model construction
- VI.2 Time represented as resource
- VI.3 Time variables in extended mathematical model

VI.1 Time constraints considered during model generation

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

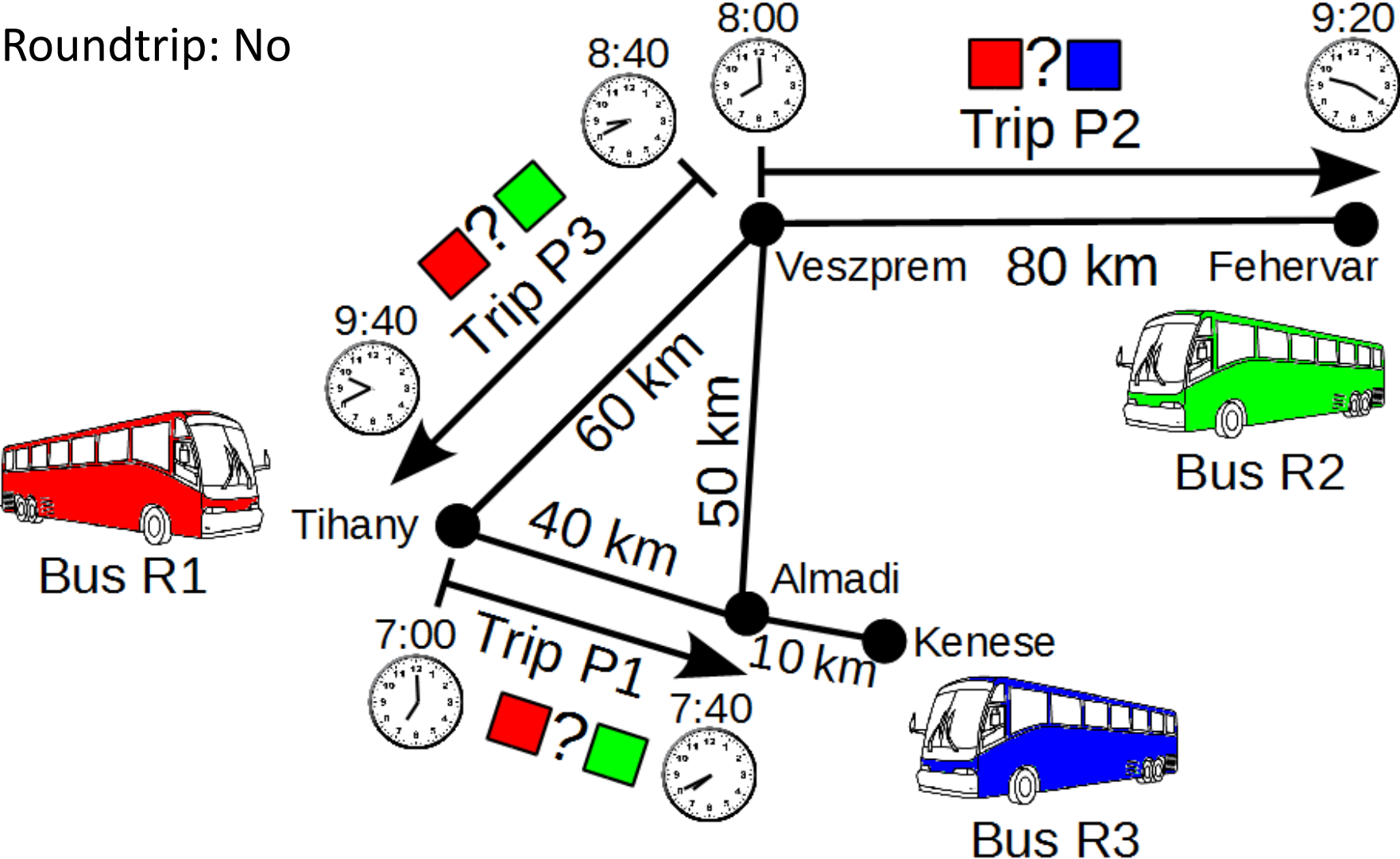
Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Illustrative Example: Map of Tasks, Resources, and Locations

Roundtrip: No



Illustrative Example

Task	Starting time	Starting location	Ending time	Ending location	Potential resources
Trip P1	7:00	Tihany	7:40	Almadi	R1, R2
Trip P2	8:00	Veszprem	9:20	Fehervar	R1, R3
Trip P3	8:40	Veszprem	9:40	Tihany	R1, R2

Resources	Location	Cost [€/km]	CO ₂ emission [g/km]	Maximum speed [km/h]
Bus R1	Tihany	0.6	375	90
Bus R2	Fehervar	0.5	400	90
Bus R3	Kenese	0.4	300	90

Vehicle Assignment Problem Defined Formally

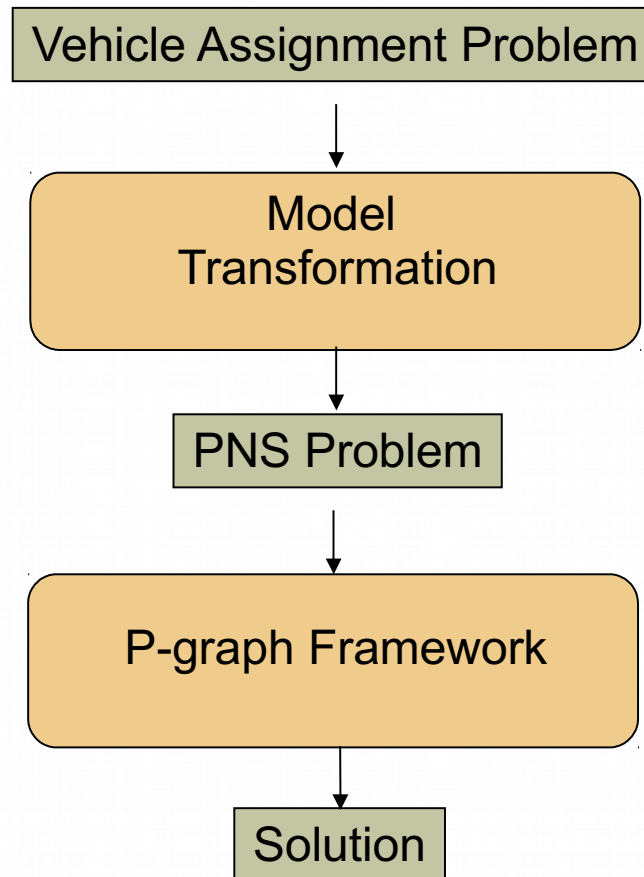
EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- Set T of tasks or trips
For each $P_i \in T$ task to be performed:
 - starting time $t_s(P_i)$ and location $l_s(P_i)$
 - ending time $t_e(P_i)$ and location $l_e(P_i)$
 - set $A(P_i)$ of resources potentially capable to perform P_i
- Set S of resources or vehicles
For each $R_k \in S$ resource:
 - initial location $l(R_k)$
 - cost $c(R_k)$
 - CO₂ emission $e(R_k)$
 - maximum speed $v_{\max}(R_k)$



Vehicle Assignment by Process-Network Synthesis



Algorithm for Transforming Vehicle Assignment Problem into Process-Network Synthesis Problem

input: $(T, S, A, t_s, t_e, l_s, l_e, d, l, v_{max})$ assignment problem

output: $(\mathcal{P}, \mathcal{R}, \mathcal{O})$ process synthesis problem

begin

$\mathcal{P} := T; \mathcal{R} := S; \mathcal{O} := \emptyset;$

for all $P_i \in T$ **do**

for all $R_k \in A(P_i)$ **do**

$\mathcal{O} := \mathcal{O} \cup \{(\{R_k\}, \{R_k - l_s(P_i) - t_s(P_i)\}), (\{R_k - l_s(P_i) - t_s(P_i)\}, \{R_k - l_e(P_i) - t_e(P_i), P_i\})\};$

end for

for all $P_j \in T$ **do**

for all $R_k \in A(P_i) \cap A(P_j)$ **do**

if $t_e(P_i) \leq t_s(P_j)$ **and** $\frac{d(l_e(P_i), l_s(P_j))}{t_s(P_j) - t_e(P_i)} \leq v_{max}(R_k)$ **then**

$\mathcal{O} := \mathcal{O} \cup \{(\{R_k - l_e(P_i) - t_e(P_i)\}, \{R_k - l_s(P_j) - t_s(P_j)\})\};$

end if

end for

end for

end for

end

Process-Network Synthesis Problem of the Illustrative Example

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és
hozzáférhetőségének együttes javítása
a Pannon Egyetemen

- **Targets:**
 - Trip P1, Trip P2, Trip P3
- **Resources:**
 - Bus R1, Bus R2, Bus R3
- **Activities:**
 - O1, O2, O3, O4, O5, O6, O7, O8, P1ByR1, P1byR2,
P2byR1, P2byR3, P3byR1, P3byR2
(14 pcs.)

Process-Network Synthesis Problem of the Illustrative Example (Cont'd)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

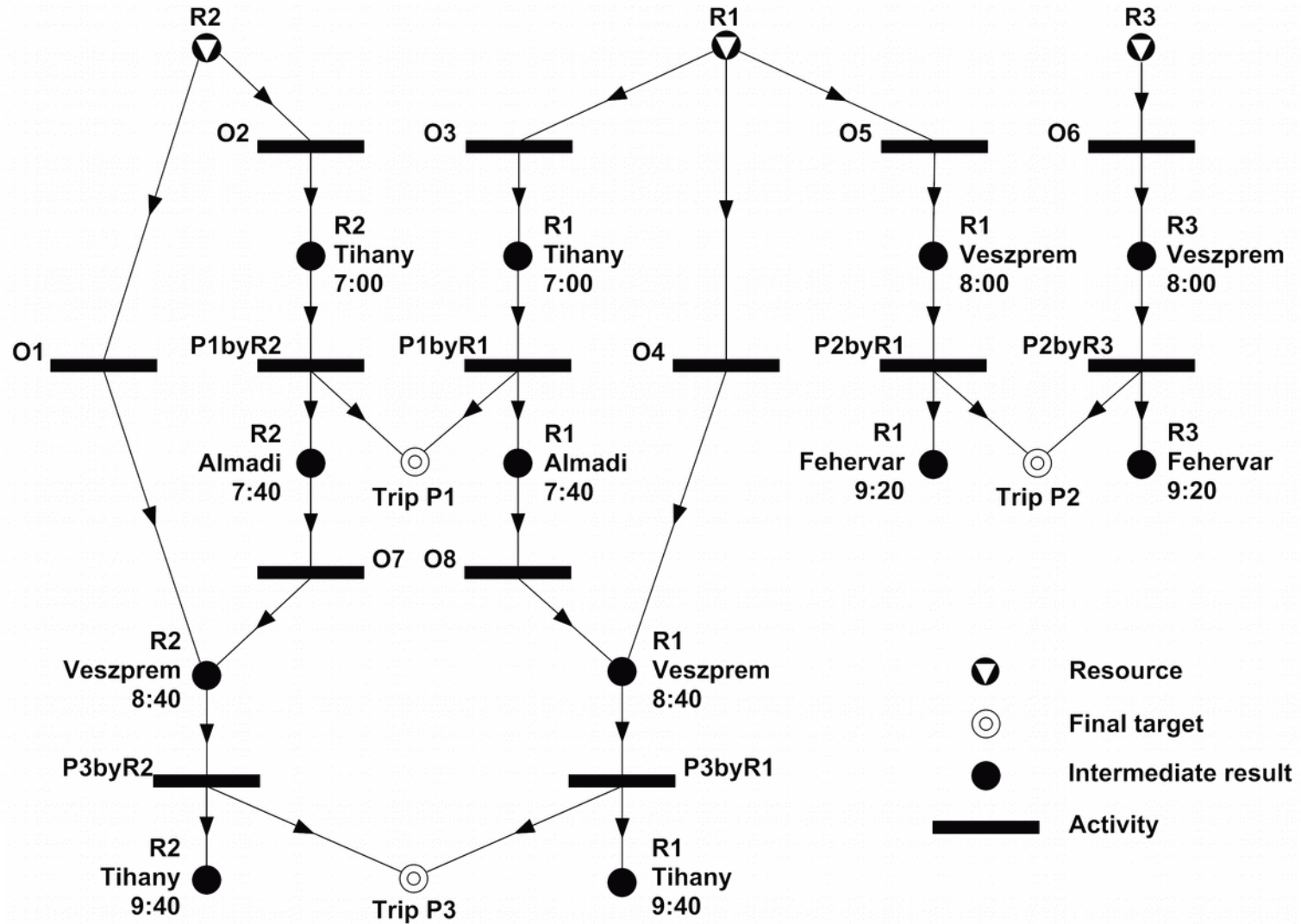
A felsőfokú oktatás minőségének és
hozzáférhetőségének együttes javítása
a Pannon Egyetemen

Activity	Precondition	Result	Cost [€]	CO ₂ [kg]
O1	R2	R2_Veszprem_8:40	40	32.0
O2	R2	R2_Tihany_7:00	70	56.00
O3	R1	R1_Tihany_7:00	0	0.00
O4	R1	R1_Veszprem_8:40	36	22.50
O5	R1	R1_Veszprem_8:00	36	22.50
O6	R3	R3_Veszprem_8:00	24	18.00
O7	R2_Almadi_7:40	R2_Veszprem_8:40	25	20.00
O8	R1_Almadi_7:40	R1_Veszprem_8:40	30	18.75
P1byR1	R1_Tihany_7:00	R1_Almadi_7:40, P1	24	15.00
P1byR2	R2_Tihany_7:00	R2_Almadi_7:40, P1	20	16.00
P2byR1	R1_Veszprem_8:00	R1_Fehervar_9:20, P2	48	30.00
P2byR3	R3_Veszprem_8:00	R3_Fehervar_9:20, P2	32	24.00
P3byR1	R1_Veszprem_8:40	R1_Tihany_9:40, P3	36	22.50
P3byR2	R2_Veszprem_8:40	R2_Tihany_9:40, P3	30	24.00

Maximal Structure for the Illustrative Example

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Alternative Assignments Generated by the P-graph Framework for the Illustrative Example

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Solution	Assignments			Mileage [km]			Total mileage [km]	Cost [€]	CO ₂ emission [kg]
	P1	P2	P3	R1	R2	R3			
#1	R1	R3	R1	150	0	140	290	146	98.25
#2	R1	R3	R2	40	140	140	320	150	113.00
#3	R2	R1	R2	140	290	0	430	201	158.00
#4	R2	R3	R2	0	290	140	430	218	159.00
#5	R2	R3	R1	120	180	140	440	229	168.50

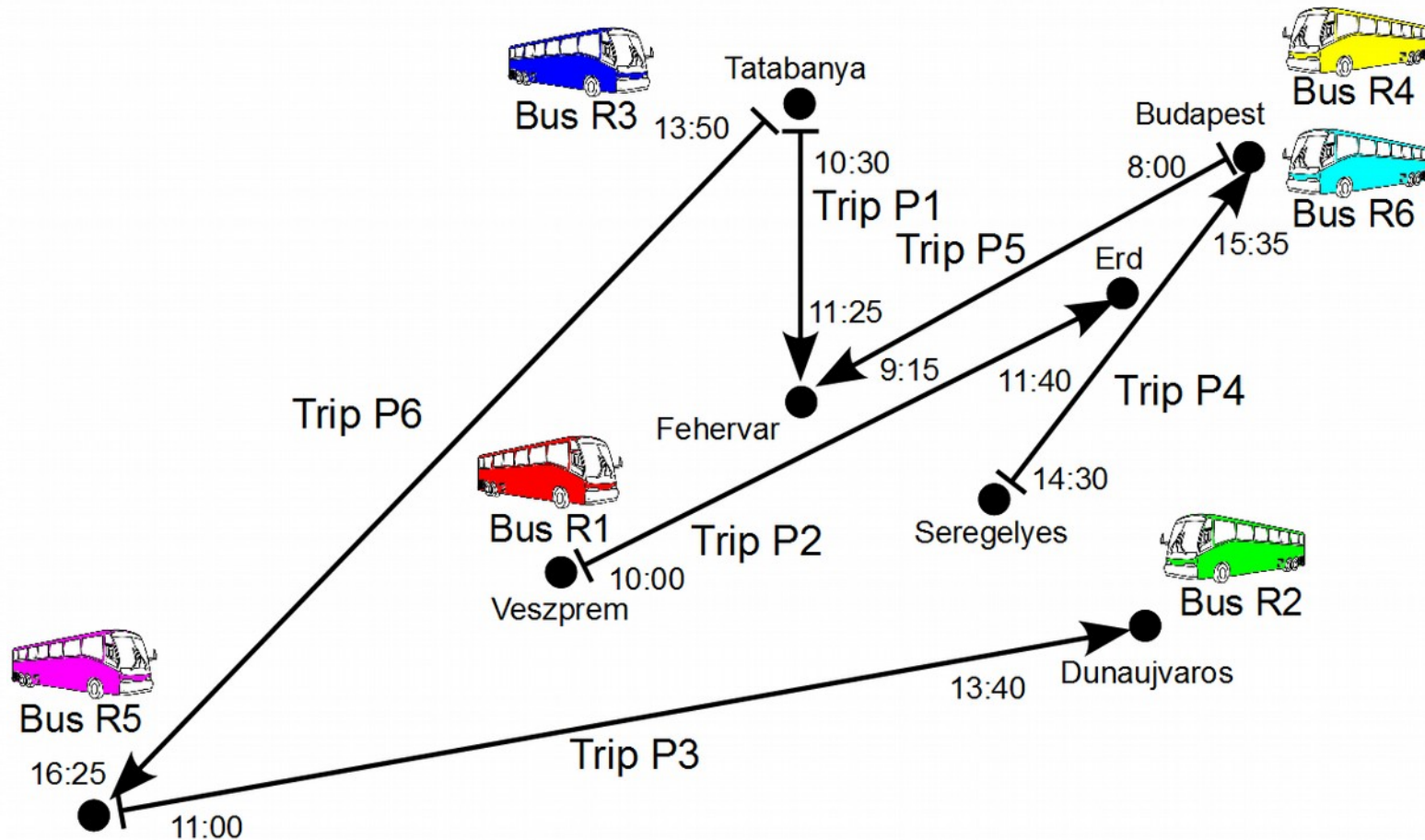
Computational time for the optimal solution: 0.002 s

Computational time for the 5 best solution: 0.004 s

(2.67 GHz Intel Core I7, 4 GB RAM)

Example #2: Map of Tasks, Resources, and Locations

Roundtrip: YES



Example #2

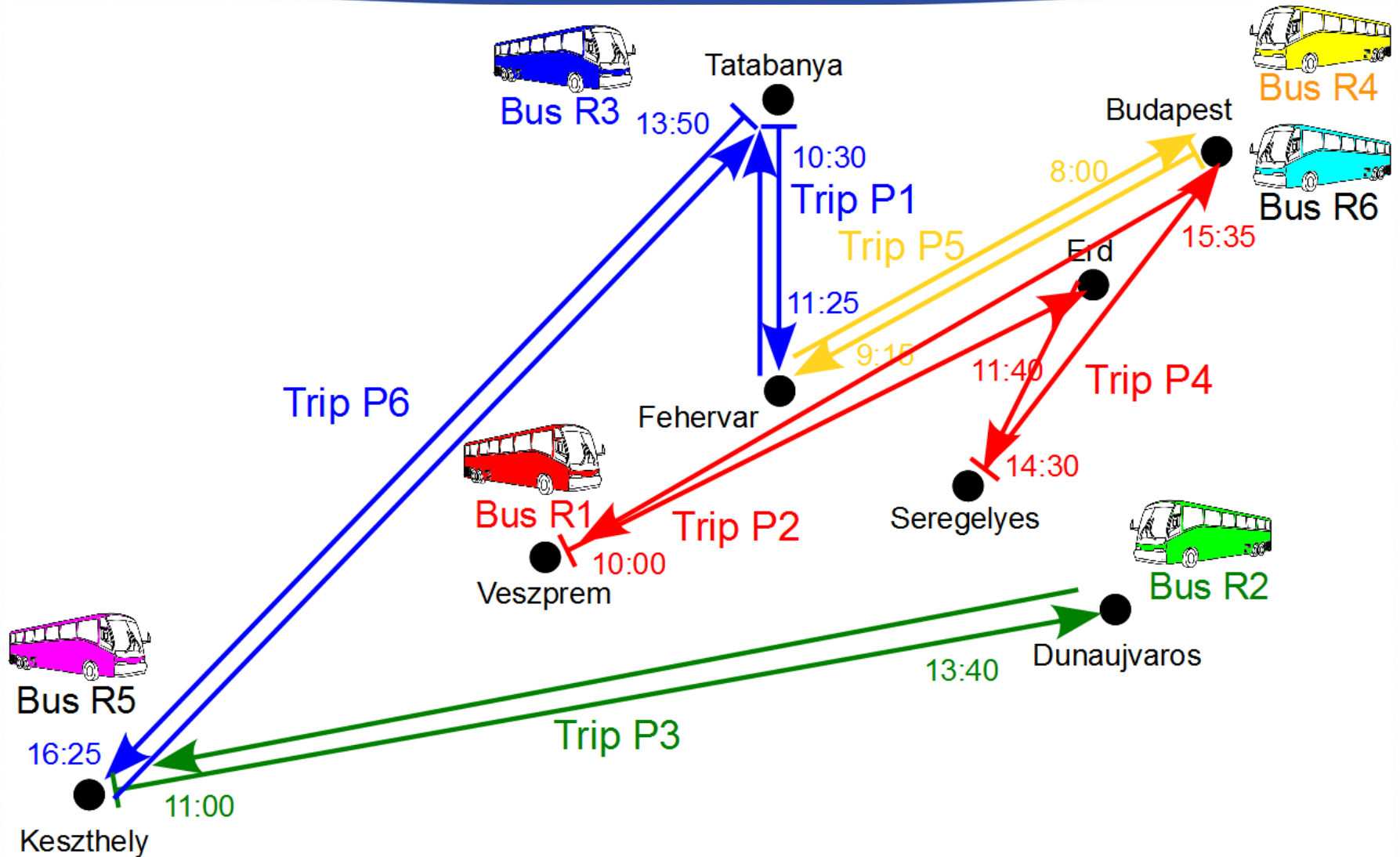
Task	Starting time	Starting location	Ending time	Ending location	Potential resources
Trip P1	10:30	Tatabánya	11:25	Fehérvár	R1, R2, R3, R4, R5, R6
Trip P2	10:00	Veszprém	11:40	Erd	R1, R2, R3, R4, R5, R6
Trip P3	11:00	Keszthely	13:40	Dunaujvár	R1, R2, R3, R4, R5, R6
Trip P4	14:30	Seregelyes	15:35	Budapest	R1, R2, R3, R4, R5, R6
Trip P5	8:00	Budapest	9:15	Fehérvár	R1, R2, R3, R4, R5, R6
Trip P6	13:50	Tatabánya	16:25	Keszthely	R1, R2, R3, R4, R5, R6

Resources	Location	Cost [€/km]	CO ₂ emission [g/km]	Maximum speed [km/h]
Bus R1	Veszprém	0.8	300	60
Bus R2	Dunaujvár	0.8	300	60
Bus R3	Tatabánya	1.2	400	60
Bus R4	Budapest	1.2	400	60
Bus R5	Keszthely	1.5	375	60
Bus R6	Budapest	1.5	375	60

Solution for Example #2 by the Heuristic Method

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Process-Network Synthesis Problem of Example #2

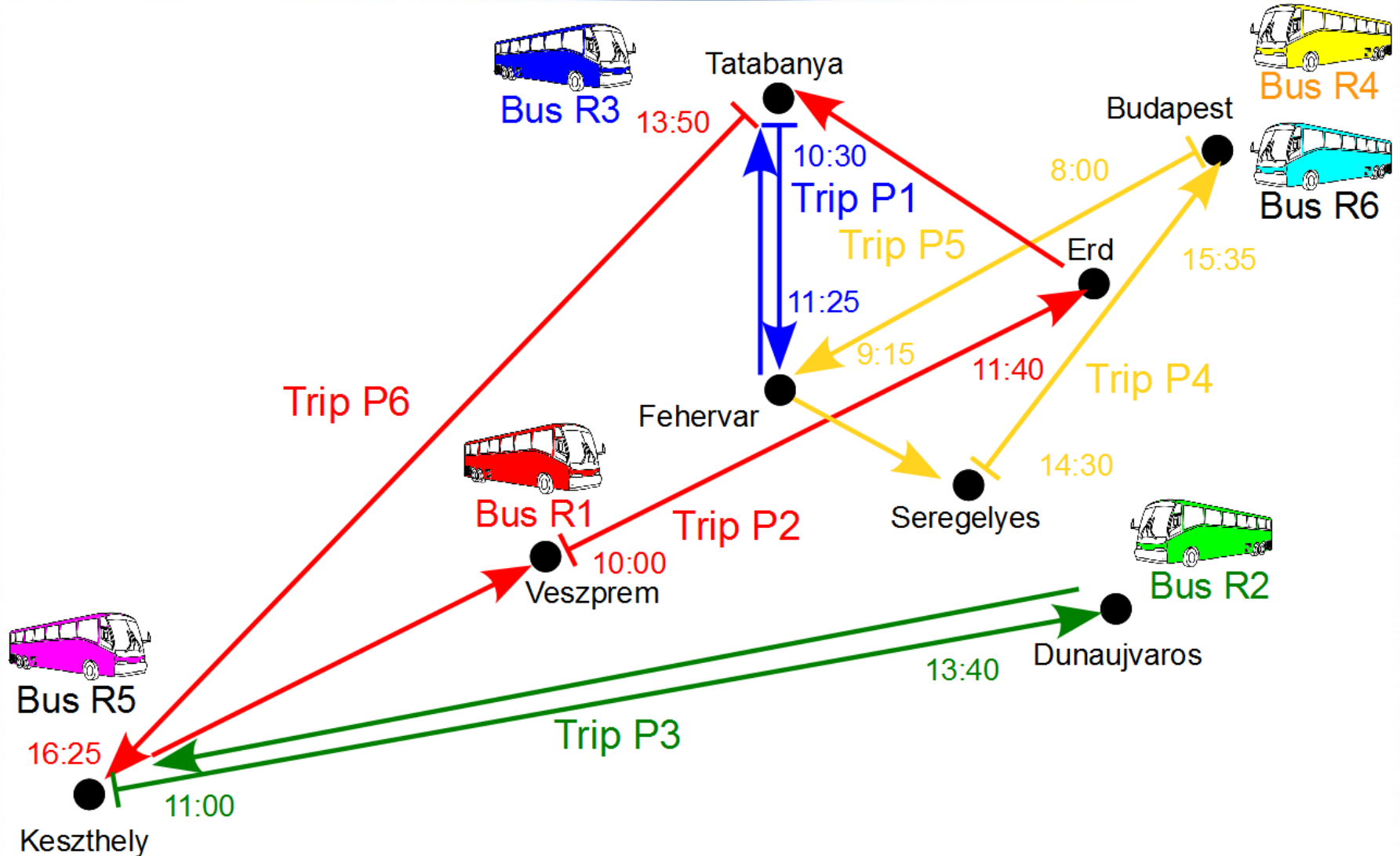
EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és
hozzáférhetőségének együttes javítása
a Pannon Egyetemen

- **Targets:**
 - Trip P1, Trip P2, Trip P3, Trip P4, Trip P5, Trip P6
- **Resources:**
 - Bus R1, Bus R2, Bus R3, Bus R4, Bus R5,
Bus R6
- **Activities:**
 - O1, O2, ...
(174 pcs.)



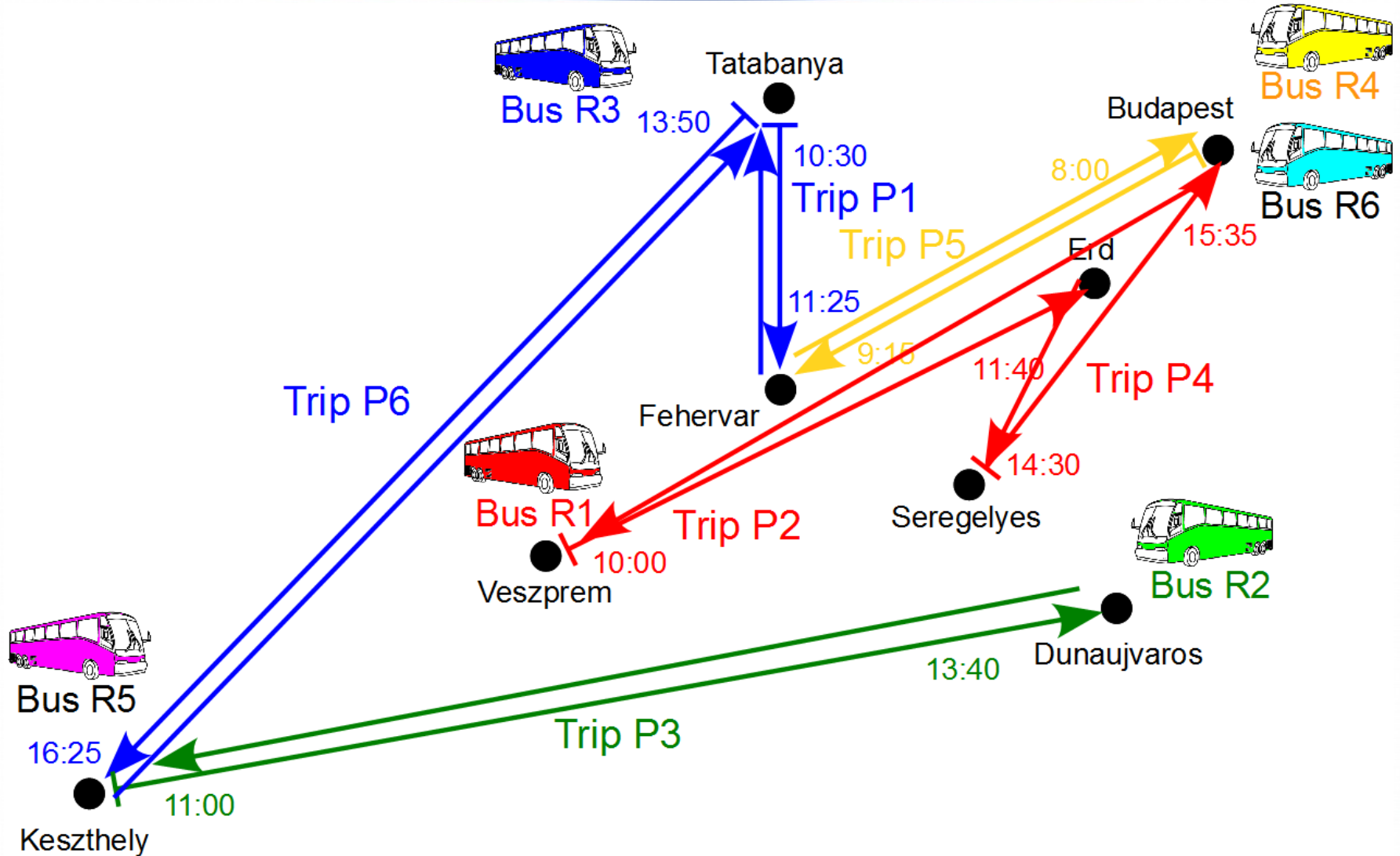
Optimal Solution for Example #2 by the P-graph Framework



Solution #186 for Example #2 by the P-graph Framework

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Alternative Vehicle Assignments Generated by the P-graph Framework for the Illustrative Example

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és
hozzáférhetőségének együttes javítása
a Pannon Egyetemen

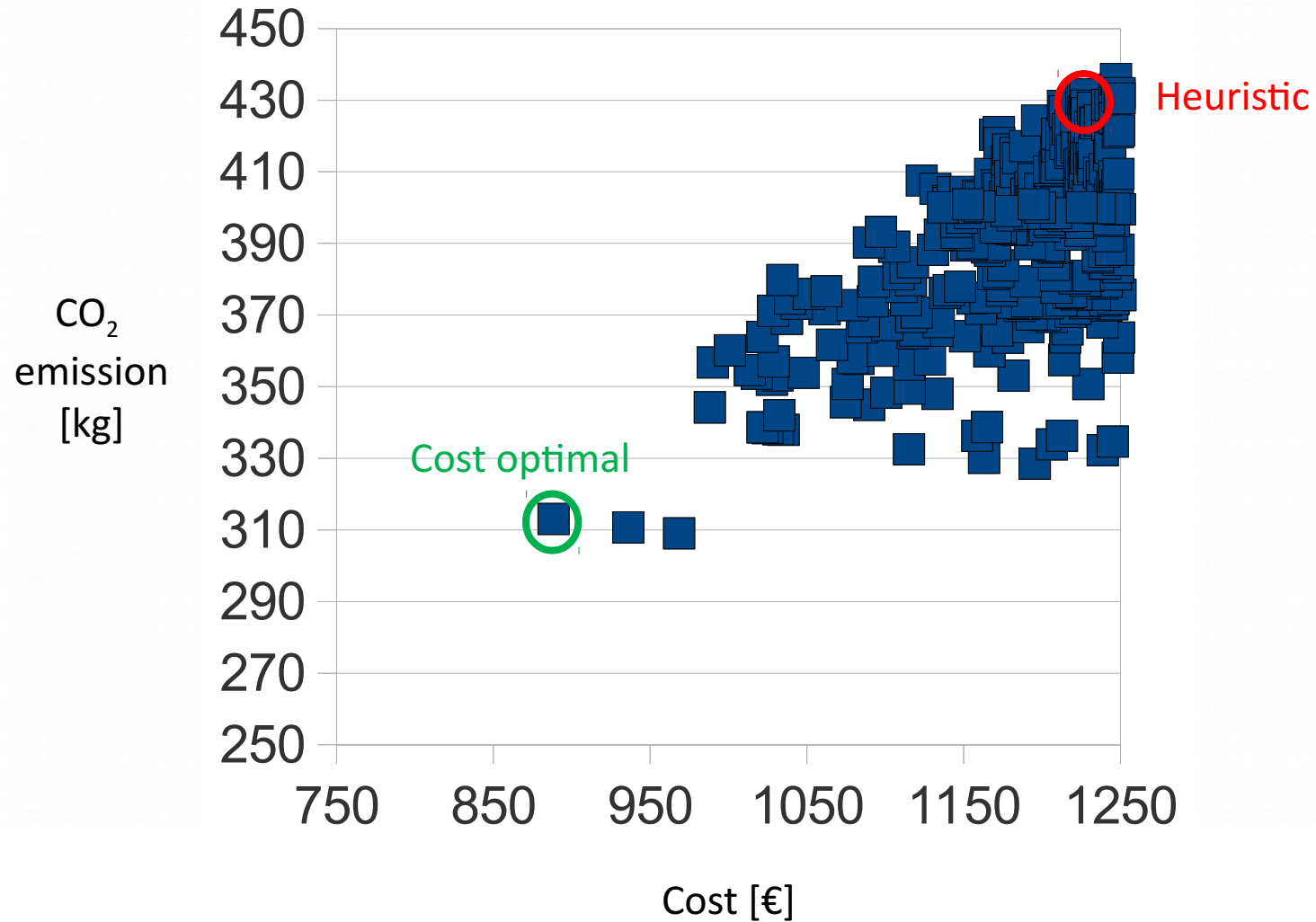
Solution	Assignments						Total mileage [km]	Cost [€]	CO ₂ emission [kg]
	P1	P2	P3	P4	P5	P6			
#1	R3	R1	R2	R4	R4	R1	977	888	313
#2	R4	R1	R2	R4	R4	R1	977	888	313
...									
...									
#186	R3	R1	R2	R1	R4	R3	1232	1212	412

Computational time for the optimal solution: 0.002 s

Computational time for the 200 best solution: 2 s

(2.67 GHz Intel Core I7, 4 GB RAM)

Cost vs. CO₂ Emission



Further potential applications

- Assignmet of vehicles to scheduled tasks
 - time table
- Assignmet of the staff to scheduled tasks
 - time table
 - project management
- ...

VI.2 Time modelled as resource

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok

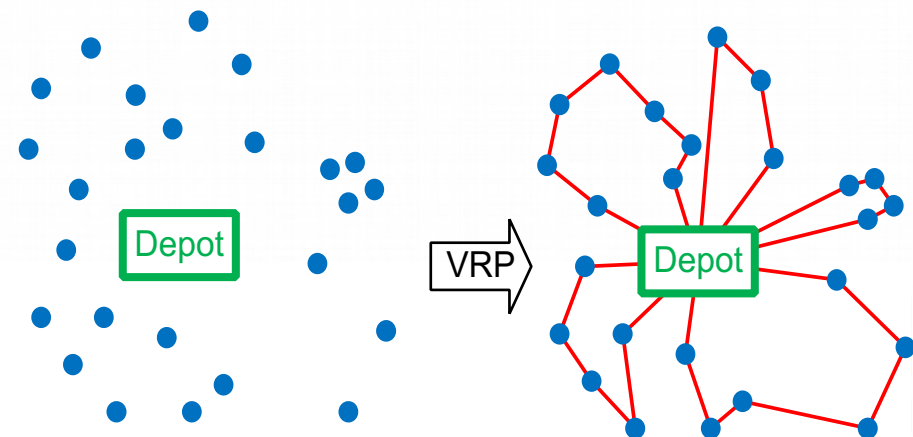


BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Vehicle Routing Problem (VRP)

- Definition of VRP:
 - given are:
 - central depot of specified goods
 - set of vehicles with capacities and costs
 - set of customers with given demands
 - aim: delivering the goods to the customers with minimal cost

- There are many version of the VRP



Problem Definition

- **Time critical capacitated VRP**
 - limitation for the CO₂ emission
 - **a customer can be served by multiple vehicles**
 - asymmetric distance matrix
 - different types of vehicles
- Aim: minimize the total cost

Constituents of the Problem

- Items:
 - locations (customers), vehicles, goods
 - transportation
 - capacity constraints
 - loading and unloading
 - time constraints
 - limitation for the CO₂ emission
- Interpretation of
 - **material**: precondition or entity with a property
 - **operating unit**: changes a property of the entity

Locations, Vehicles, Goods



Location A



Location B



Location C



Vehicle V1



Commodity C1



V1 in A



C1 in A



V1 in B



C1 in B

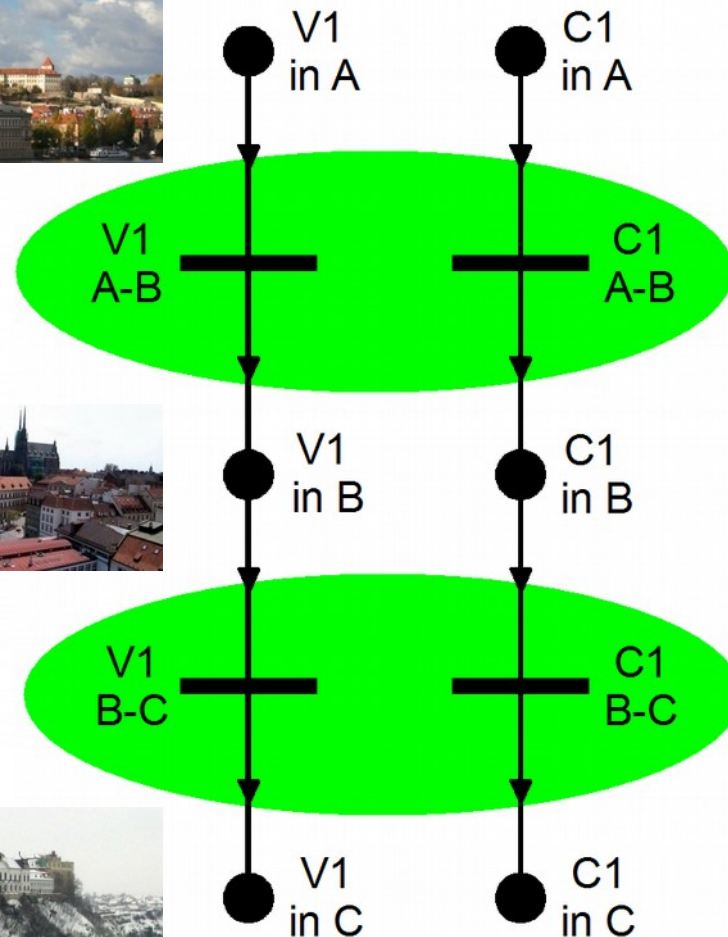


V1 in C

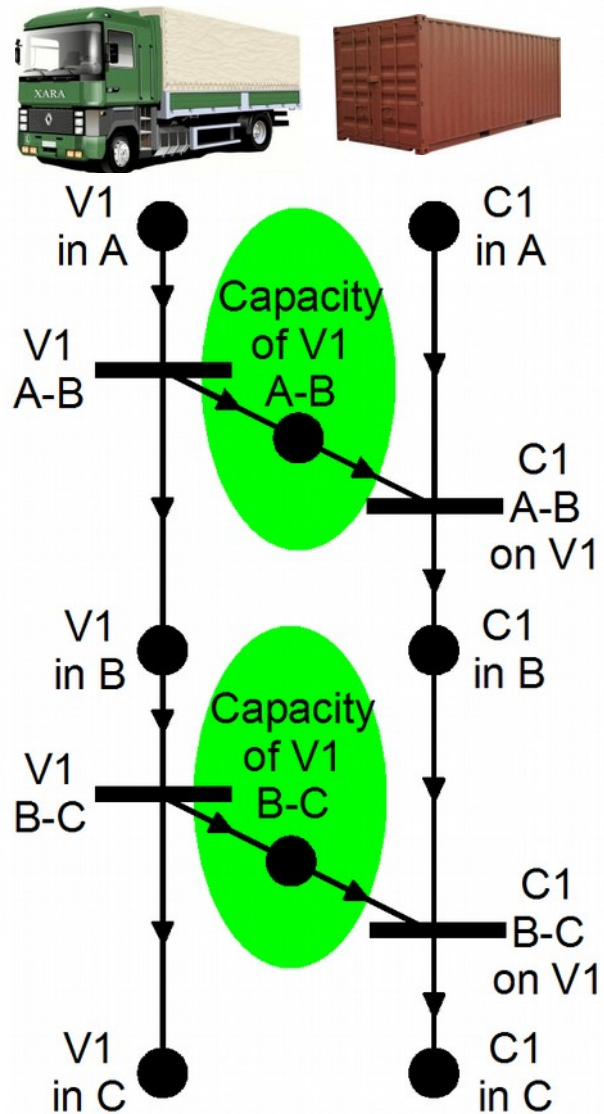


C1 in C

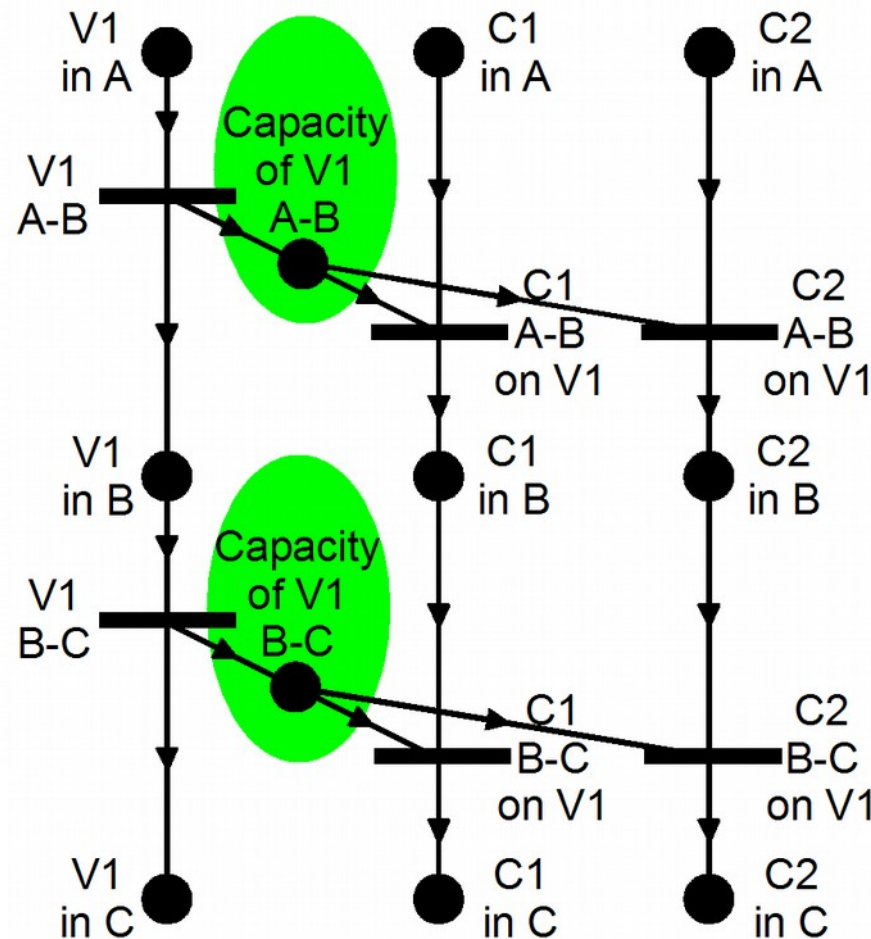
Transportations



Capacity Constraints

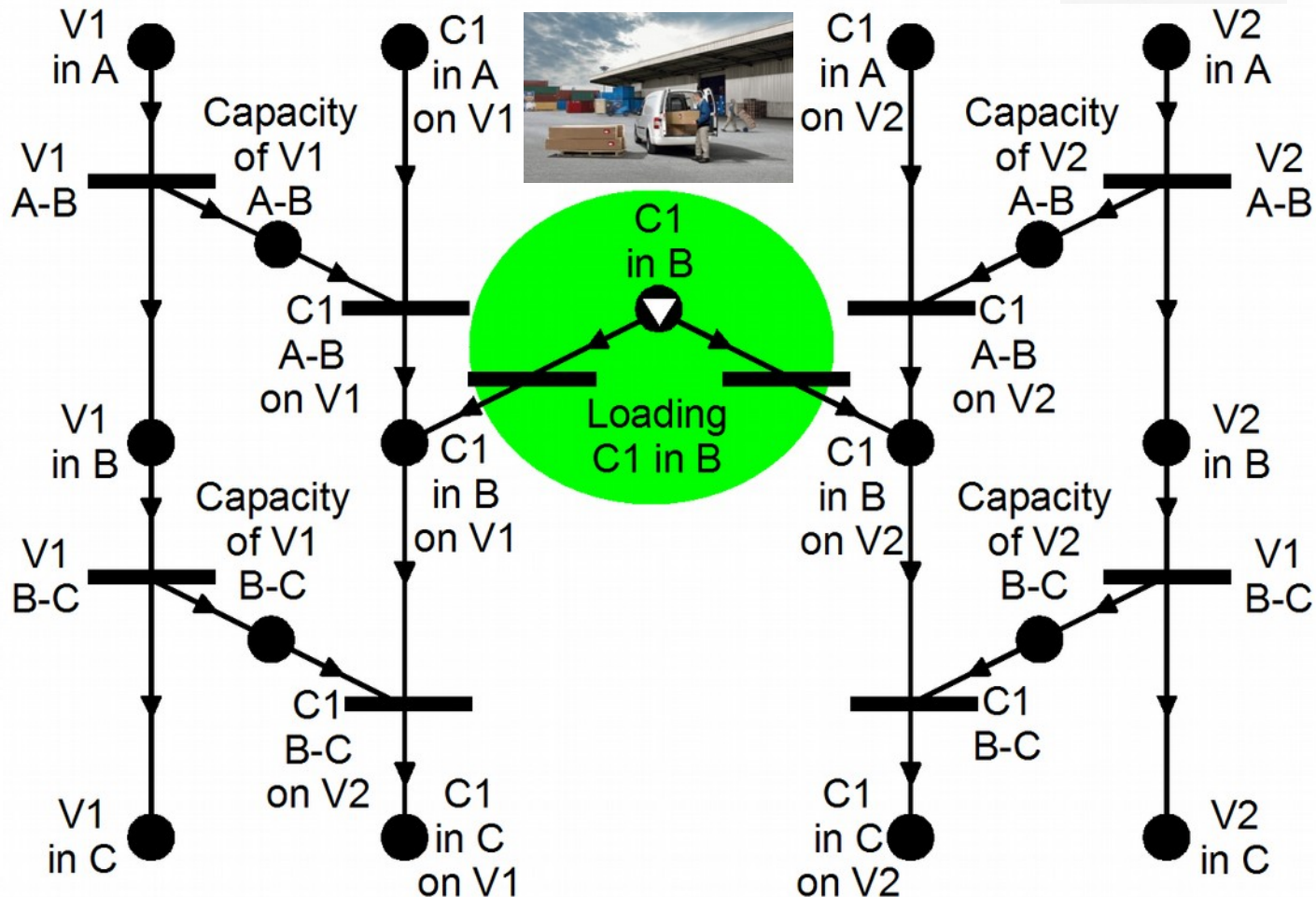


Multiple Commodities



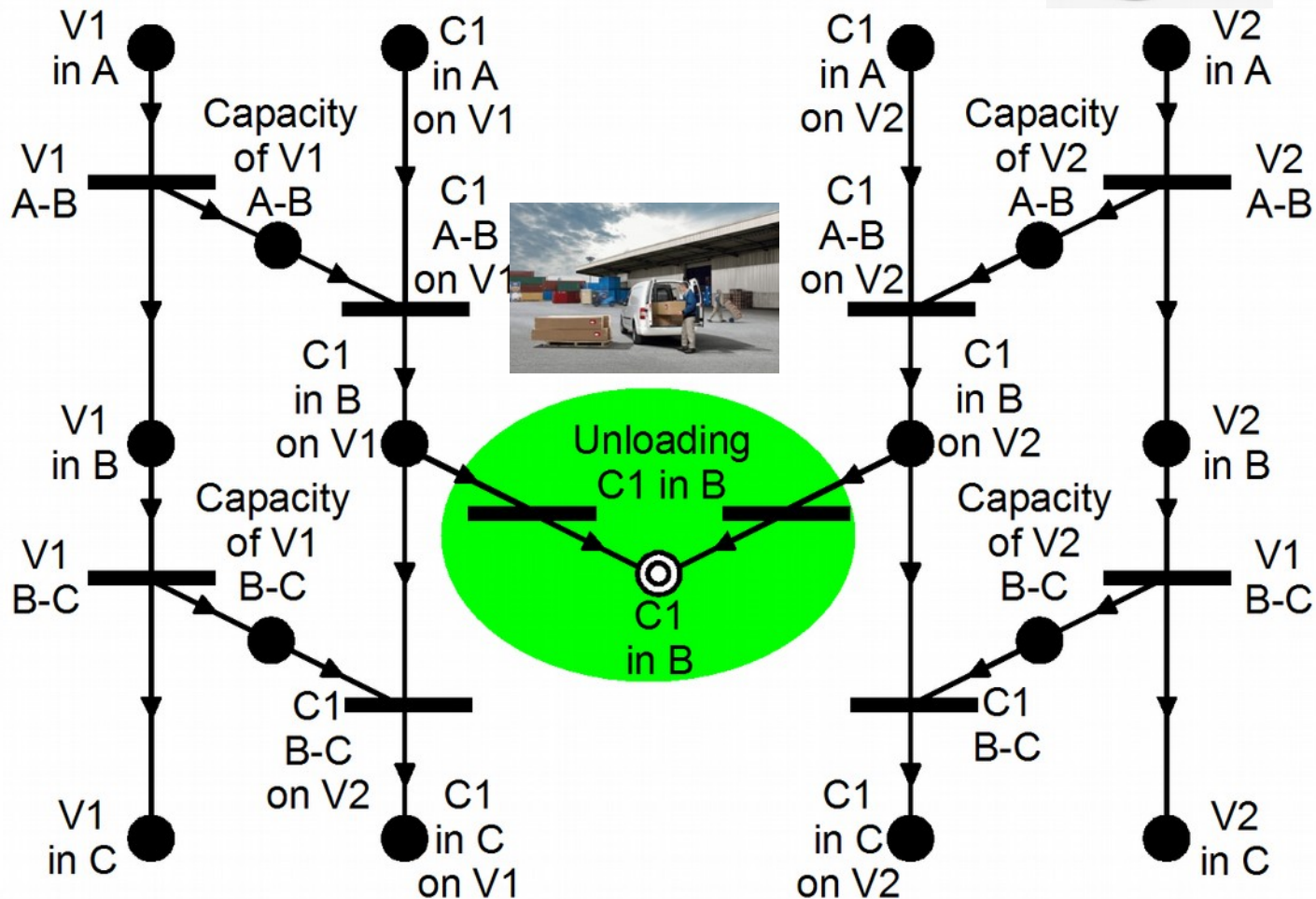
Loading

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

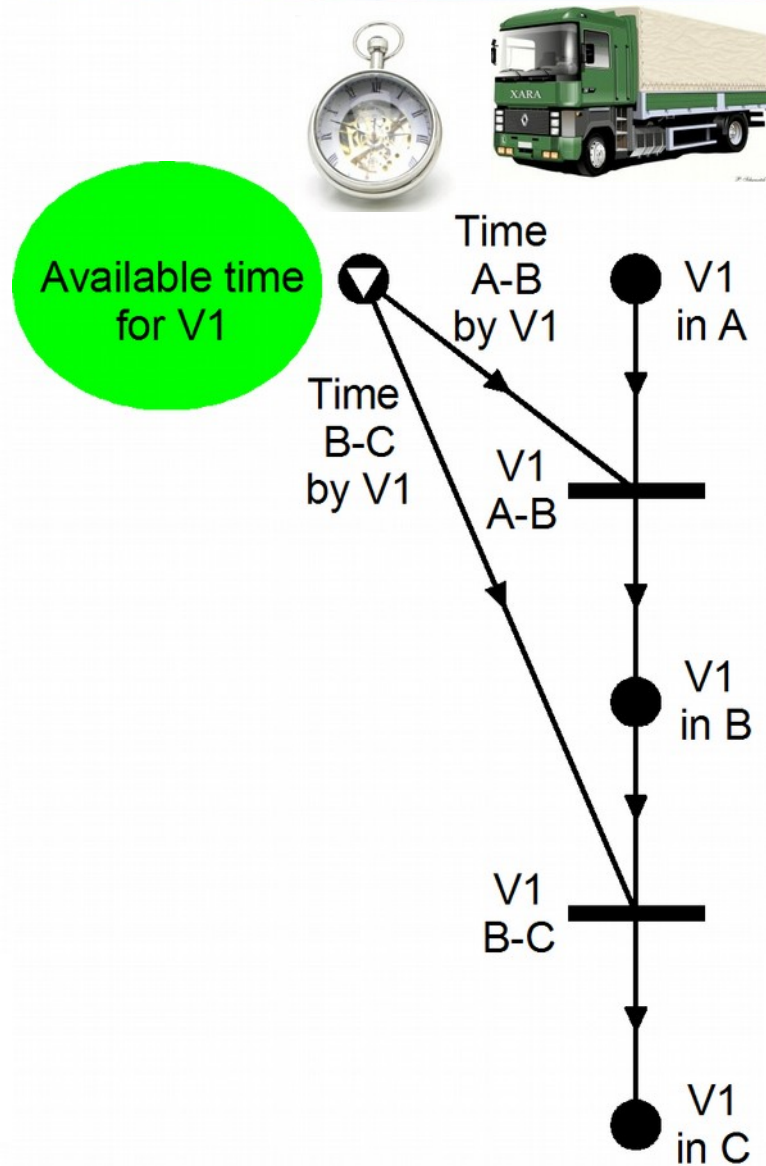


Unloading

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

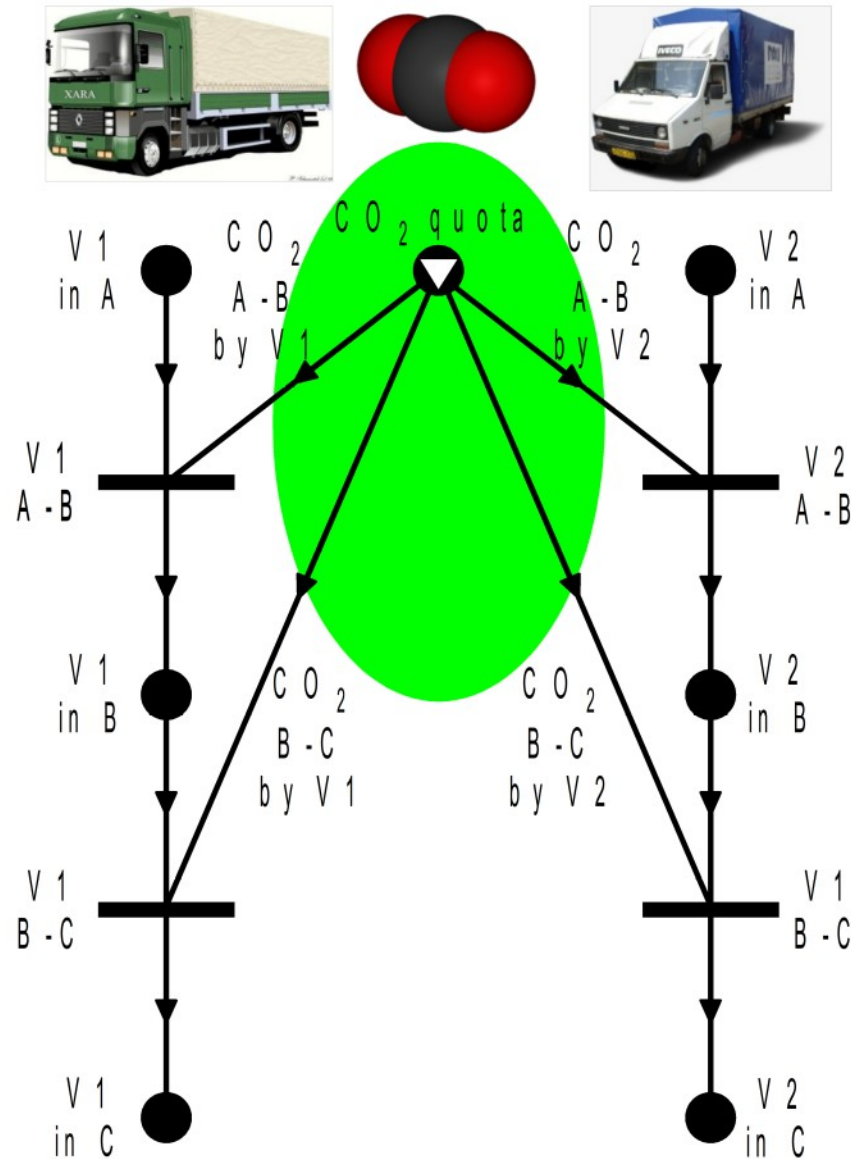


Time Constraints



Limitation for the CO₂ Emission

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



Application: Daily delivery of newspapers

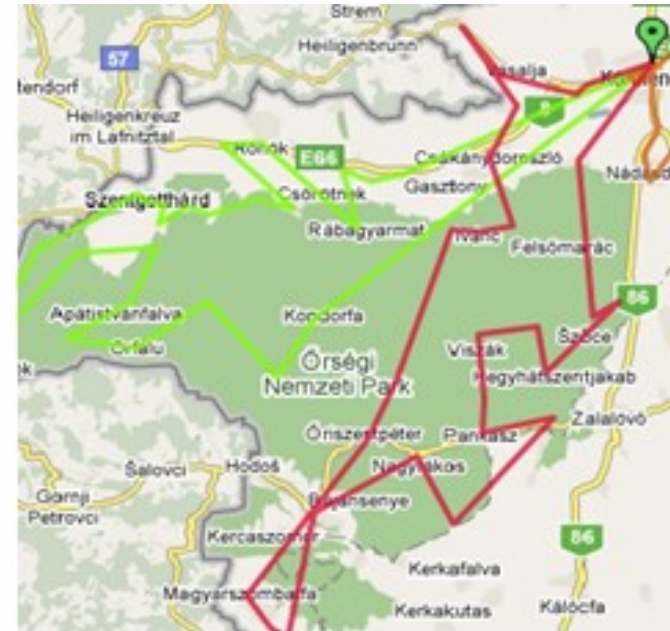
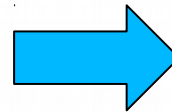
EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- 4 type of newspaper
- **1300 target locations** in 4 counties
- distribution in three levels:
 - factory - depot
 - **depot - local distributor**
 - local distributor - customer
- **time horizon: 12 am – 4 am**
 - at 4 am the last local distributor must be reached
- vehicles of 6 different capacities (300 kg – 10 t)
- lower limit on tour distance: 60 km
- cost is calculated based on the total cycle length



Changes of Routes



- **9.3%** reduction in the total **distance**
- **7.7%** reduction in the total **cost**
- **6.7%** reduction in the **CO₂** emission (approx. -42 t/year)

SZÉCHENYI 2020



VI.3 Time constraints introduced by the extension of the mathematical model

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Model Parameters of Time Constrained PNS (TCPNS)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és
hozzáférhetőségének együttes javítása
a Pannon Egyetemen

In addition to the parameters of fixed charged PNS:

- Fix time charge: tf_i
- Proportional time constant: tp_i
- Time upper bound on latest availability of products:

$$Ut_j = \begin{cases} \text{given value} \geq 0, \forall m_j \in P \\ \max_{m_j \in P} \{Ut_j\}, \textit{otherwise} \end{cases}$$

- Time lower bound on the earliest availability of resources:

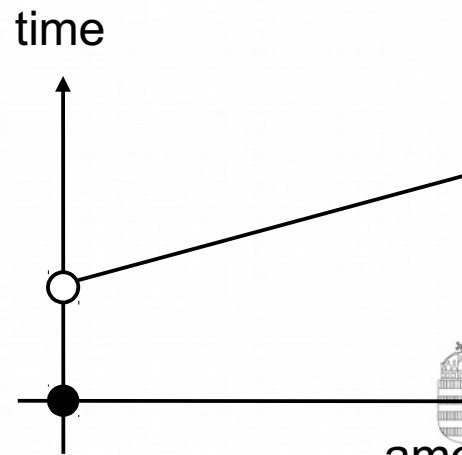
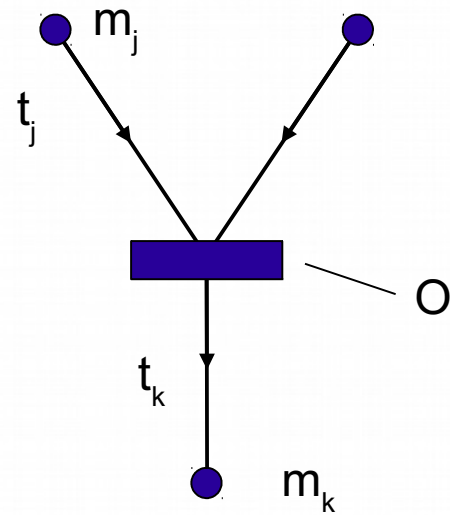
$$Lt_j = \begin{cases} \text{given value} \geq 0, \forall m_j \in R \\ 0, \textit{otherwise} \end{cases}$$

Supply Chain Synthesis: Modeling timing constraints

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- Time constraints:
$$t_k \geq t_j + tp_{i,i}x_i + tf_{i,i}y_i$$



Problem Definition of TCPNS

The aim is to determine the network (m^*, o^*, x^*, z^*) which satisfies the following conditions and z^* is minimal:

$$\forall m_j \in M : Lt_j \leq t_{m_j} \leq Ut_j$$

$$o_i = (\alpha_i, \beta_i) \in o, \forall m_j \in \alpha_i : t_{o_i} \geq t_{m_j}$$

$$o_i = (\alpha_i, \beta_i) \in o, \forall m_j \in \beta_i : t_{m_j} \geq t_{o_i} + tf_i + x_i * tp_i$$

Illustrative Example

Depo in Székesfehérvár

Depo in Veszprém

Assembly in Székesfehérvár

Target: 240 PC in Balatonalmádi



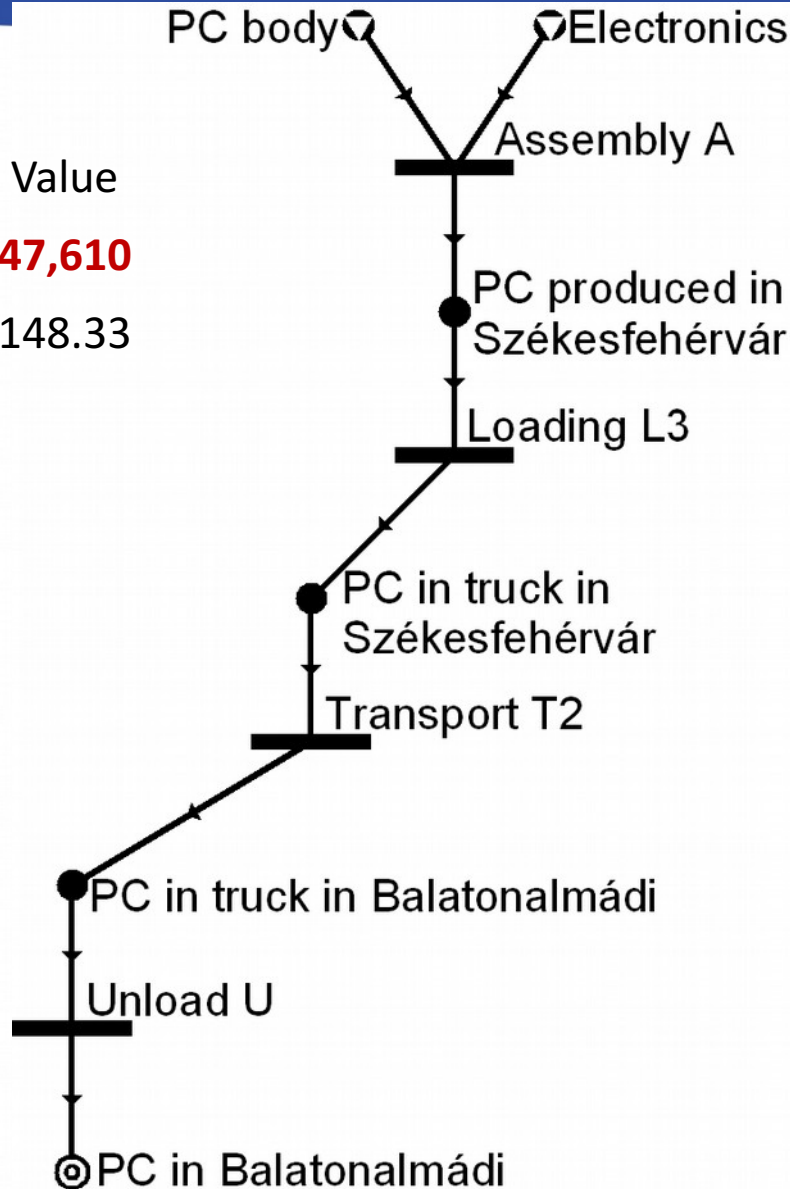
Problem Parameters

Entty	Type	Bound
PC chassis	resource	≤ 800
Electronics	resource	≤ 800
PC in Székesfehérvár Depo	resource	≤ 400
PC in Veszprém Depo	resource	≤ 200
PC in Balatonalmádi	target	≥ 240

Activity	Cost [€]		Duration [min]	
	Fixed	Proportional	Fixed	Proportional
Assembly A	10	18	60	35
Loading L1	20	0	15	0.8
Loading L2	20	0	15	0.8
Loading L3	20	0	15	0.8
Transport T1	18	0	24	0
Transport T2	40	0	50	0
Unload U	20	0	15	0.7

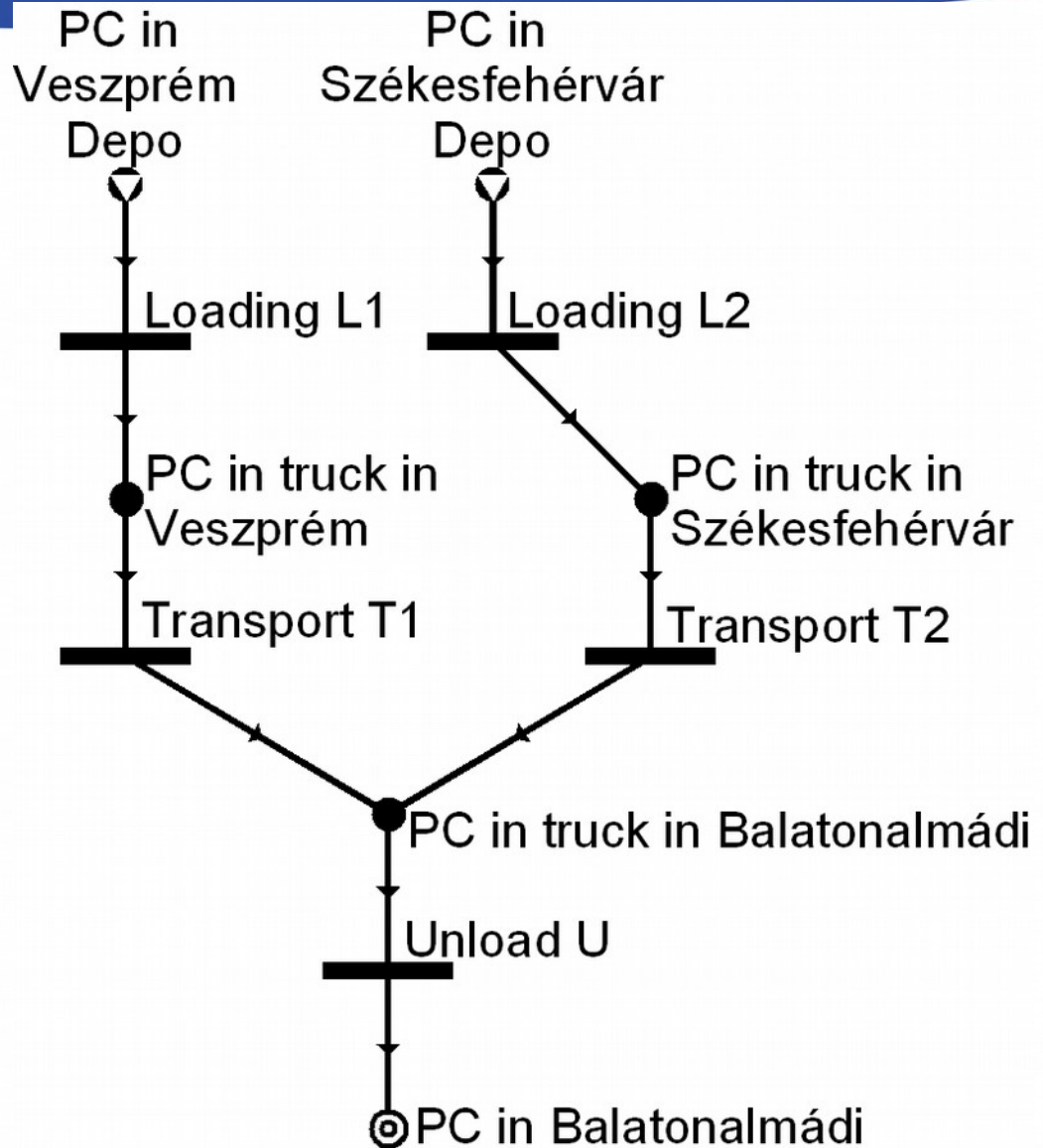
The Cheapest Structure: Str3

Objective	Value
Cost [€]	47,610
Duration [h]	148.33



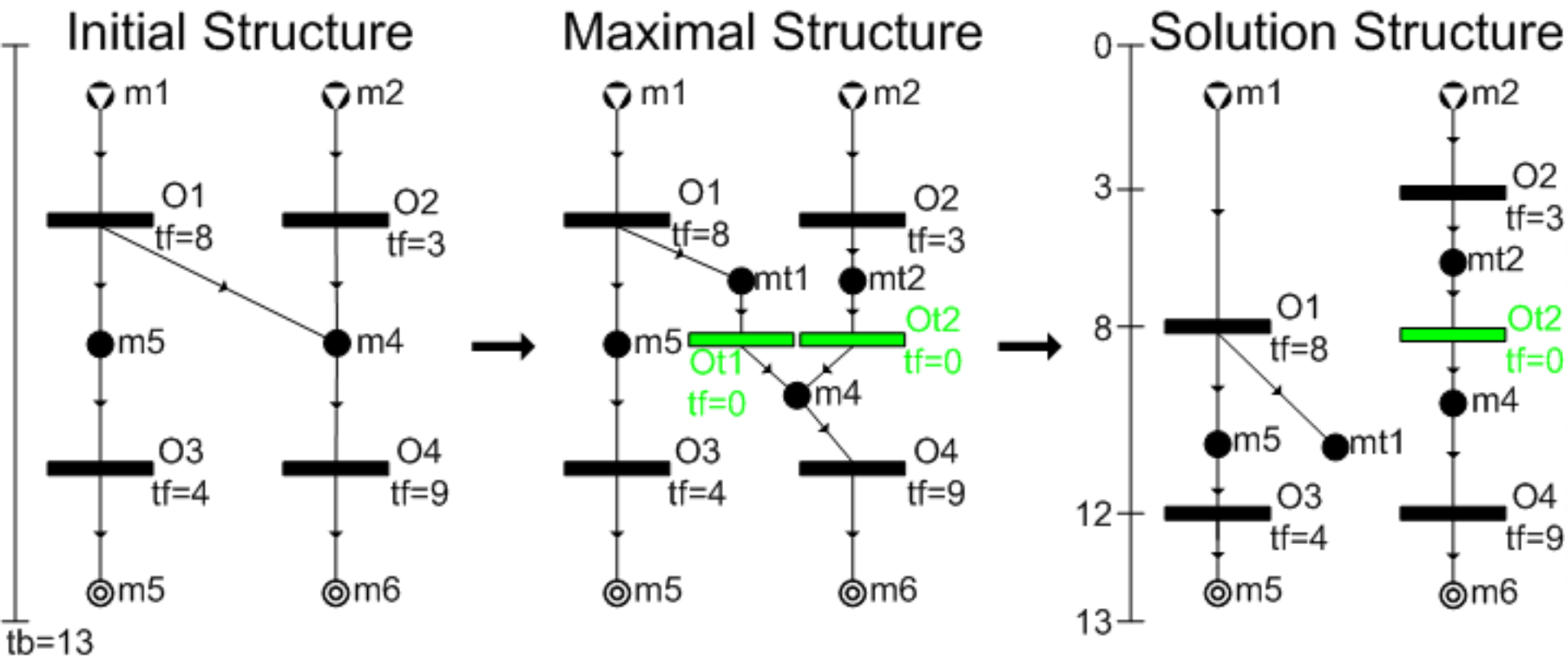
The Fastest Structure: Str6

Objective	Value
Cost [€]	47,610
Duration [h]	5.52 – 6.37



Extension of the Maximal Structure

Include **operating units** to clarify precedence



Relaxed Mathematical Model of TCPNS

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

$$tb = \max_{m_j \in P} \{Ut_j\}$$

$$\forall o_i = (\alpha_i, \beta_i) \in o, \forall m_j \in \beta_i :$$

$$t_{m_j} \geq t_{o_i} + x_i * tp_i + y_i * (tb + tf_i) - tb$$

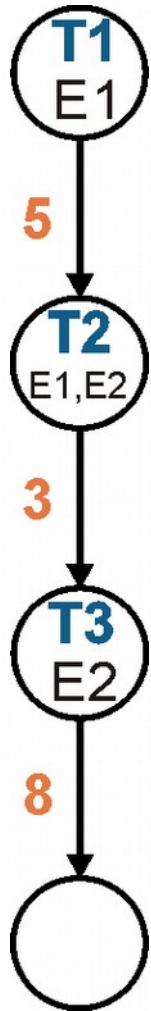
$$y_i = 0$$

$$y_i = 1$$

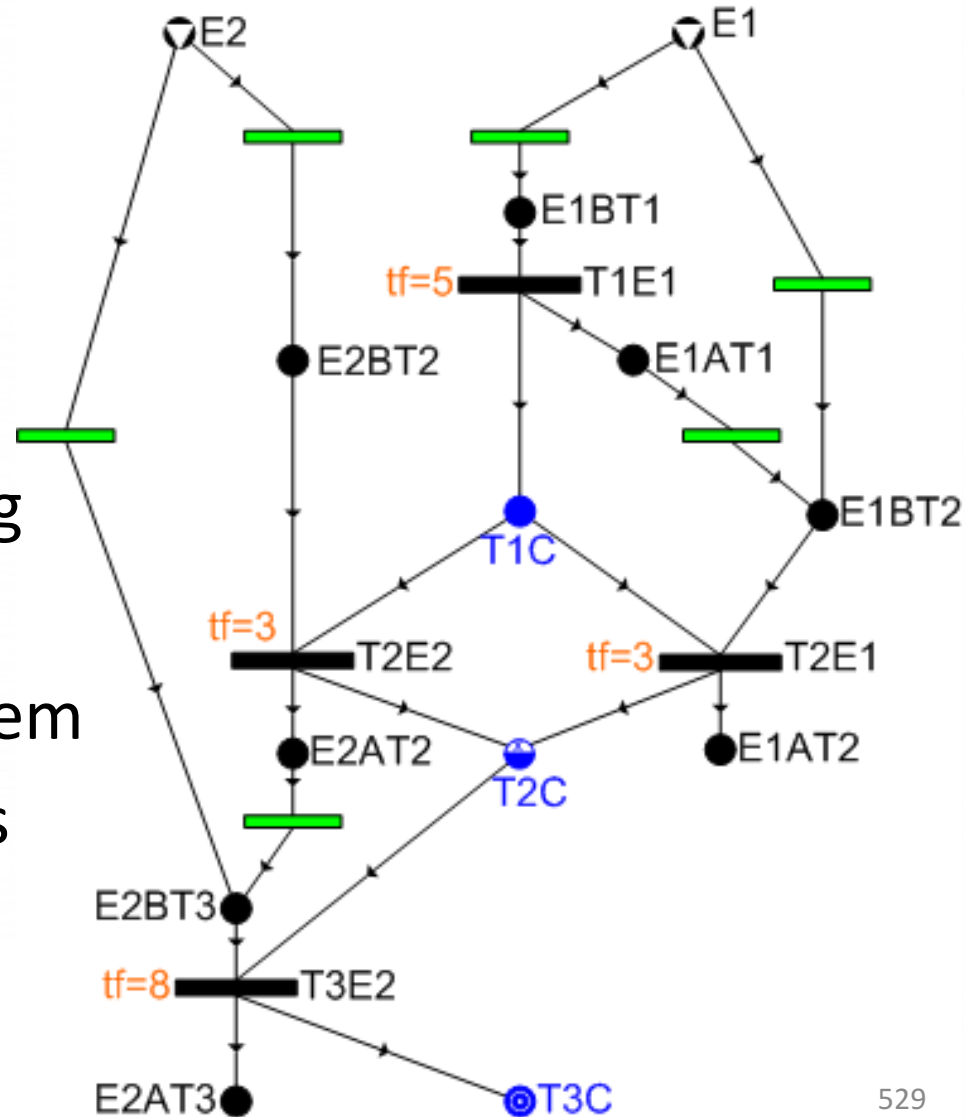
$$t_{m_j} \geq t_{o_i} - tb$$

$$t_{m_j} \geq t_{o_i} + x_i * tp_i + tf_i$$

Scheduling by TCPNS: Illustration



Formulating scheduling problem as a time constrained PNS problem with mutual exclusions



Solving Scheduling Problem by TCPNS

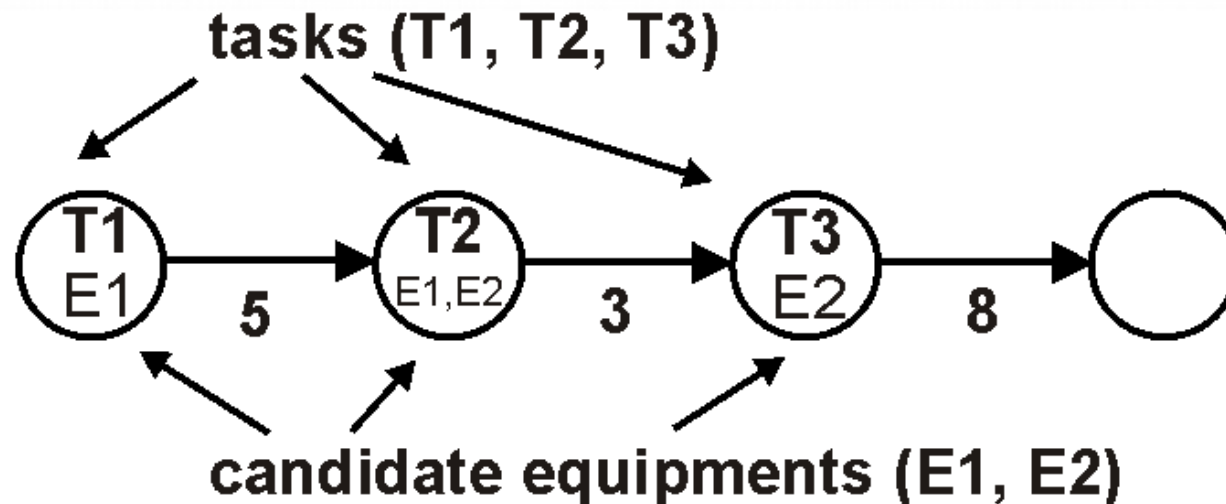
EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- **Automatic model generation** for
 - Unlimited Intermediate Storage (UIS),
 - No Intermediate Storage (NIS) and
 - Zero Wait (ZW)scheduling problems.
- Resources: Equipments
- Operating units:
 - Execution of tasks
 - Changeovers

Scheduling: Problem Definition

- In processes where operating units share resources the scheduling of the resources have to be optimized to satisfy the deadline
- Each task have to be performed by exactly one equipment in given order (recepte) within the time horizon (time bound)

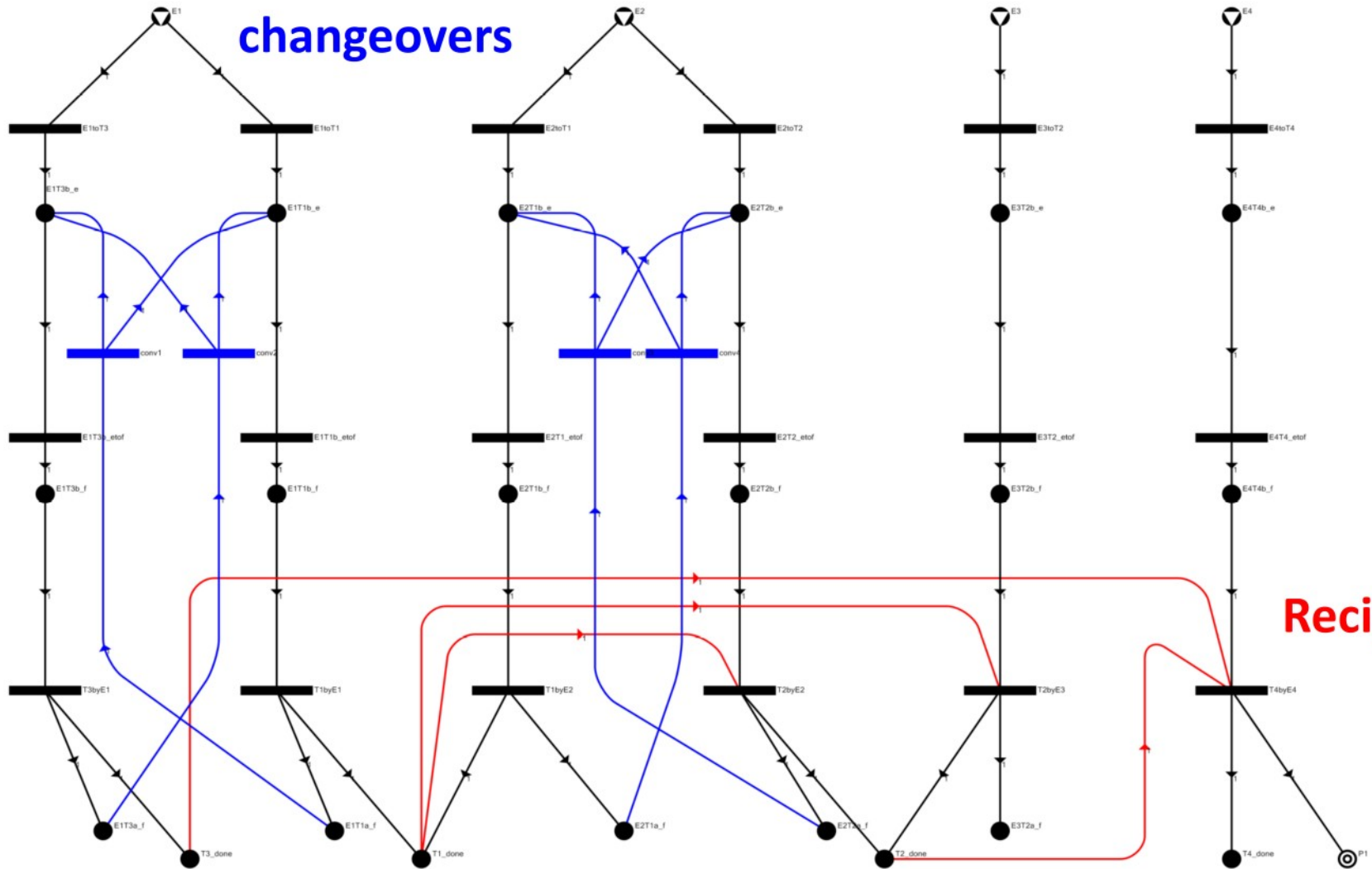


Formulating UIS Scheduling Problem

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Potential changeovers



Recipe

Model transformation: Scheduling problem to TCPNS problem

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Algorithm SGSuperstructure

for all equipment unit e **do**

add node for equipment unit e to the recipe-graph

let set S_e contain those tasks that can be produced by equipment unit e

for all $t_1 \in S_e$ **do**

add an arc from the node of equipment unit e to task t_2

for all $t_2 \in S_e, t_1 \neq t_2$ **do**

add potential schedule-arc (t_1, t_2) to the recipe-graph

endfor

endfor

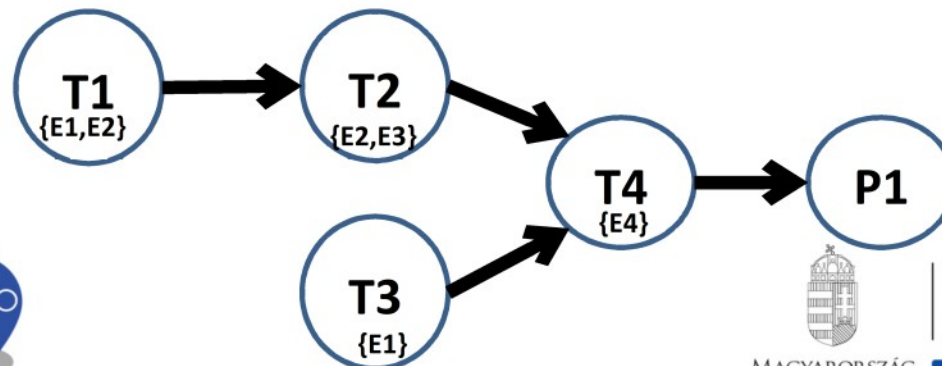
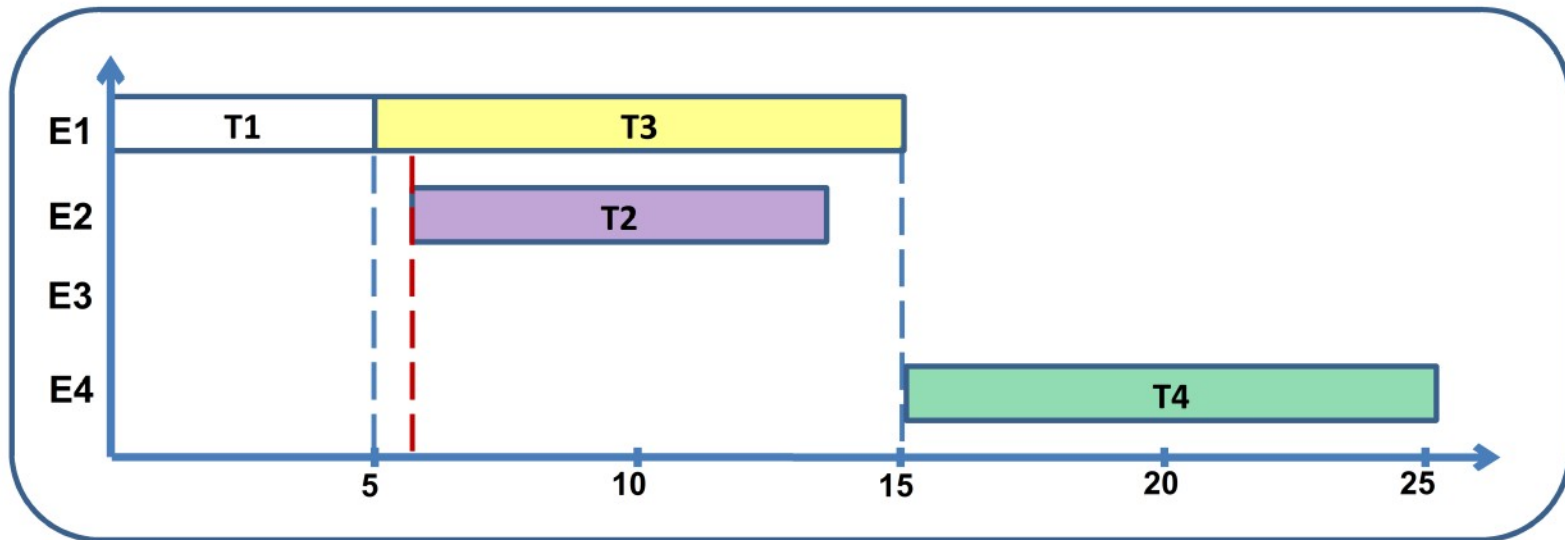
endfor

Solution of UIS Scheduling Problem

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- UIS case: **25 h**



Comparison of Scheduling Methods

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

	Slot MILP model	Precedence based MILP model	S-graph	TCPNS
Automatic model generation	✓		✓	✓
MILP model	✓			✓
Graph representation	✓	✓		✓
Combinatorial Acceleration			✓	✓
Distributed loading			✓	✓
Mixed storage policy		✓		✓
Avoid cross-transfer	✓	✓		✓
	ε	ε	✓	✓



Scheduling by TCPNS

- Superstcuture approach
- MILP model export is an option
- Establishes a potential synergy of MILP and graph-theoretic methods

Further potential applications

- Capacitated scheduling
- Vehicle routing with time windows
- ...

VII. References

SZÉCHENYI 



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

References

- Illustrative examples for algorithms MSG, SSG, and ABB were originally prepared for presentation:
- By the help of a large number of contributors:

COMBINATORIAL FRAMEWORK FOR PROCESS DESIGN AND SYNTHESIS

F. Friedler

Center for Advanced Process Optimization
Department of Computer Science
University of Veszprém
Veszprém, Hungary

Demonstration Material

April 2000

CONTRIBUTORS

Adonyi, Róbert
Bertók, Botond
Biros, Gábor
Feng, Gangyi
Friedler, Ferenc
Fülöp, János
Ercsey, Zsolt
Halász, László
Hangos, Katalin

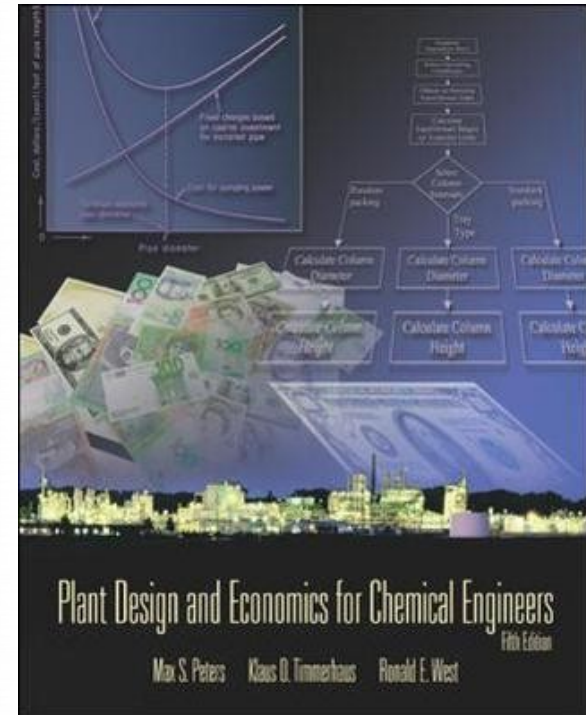
Heckl, István
Holczinger, Tibor
Imreh, Balázs
Kalotai, Levente
Kovács, Zoltán
Nagy, Ádám
Papp, László
Varga, József

References (Cont'd)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- Illustrative examples for for the step-by-step illustration of algorithms B&B and ABB were originally prepared for textbook:



References (Cont'd)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

- Illustrative examples for for supply-chain modeling were originally prepared for presentation:
- First published in textbook

SUPPLY CHAIN MODELING

Magyarország e Kelet-Európai logisztika központja - Innovatív logisztikai képzés e-learning alapú fejlesztése
TÁMOP-4.1.2.A/1-11/1-2011-0088

Botond Bertók
Tibor Holczinger

Projekt megvalósulása:
2012.01.01-2014.03.31.

Főkezdőmunkaadó neve, címe:
Pannon Egyetem
8200 Veszprém, Egyetem utca 10.

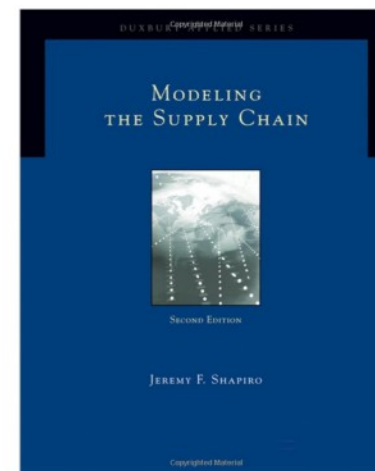
Kedőmunkaadó neve, címe:
Miskolci Egyetem
3515 Miskolc, Egyetemváros 1.

Az Európai Unió és a Magyar Állam támogatásával nyújtott összes támogatás:
190 417 422.- Ft.



2013.

 A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.



VIII. Further reading

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Book Chapter on the P-graph Framework in Major Textbook, 2002

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

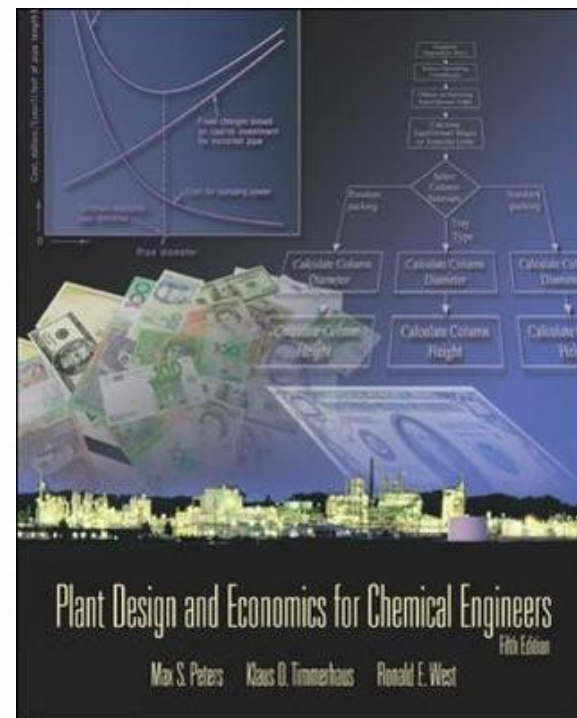
A felsőfokú oktatás minőségének és
hozzáférhetőségének együttes javítása
a Pannon Egyetemen

Flowsheet Synthesis and Development of **Plant Design and Economics for Chemical Engineers**

Fifth Edition

By Peters, Timmerhaus, and
West

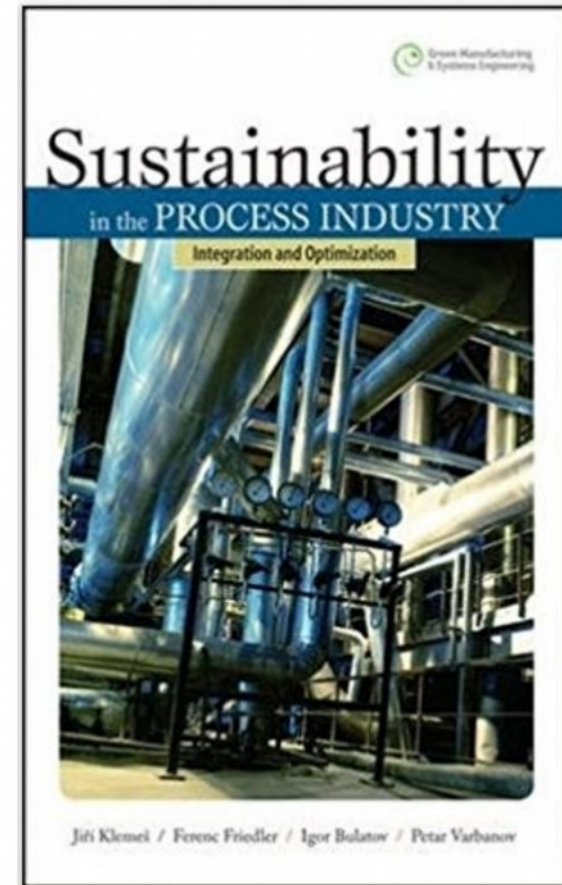
Published by McGraw-Hill



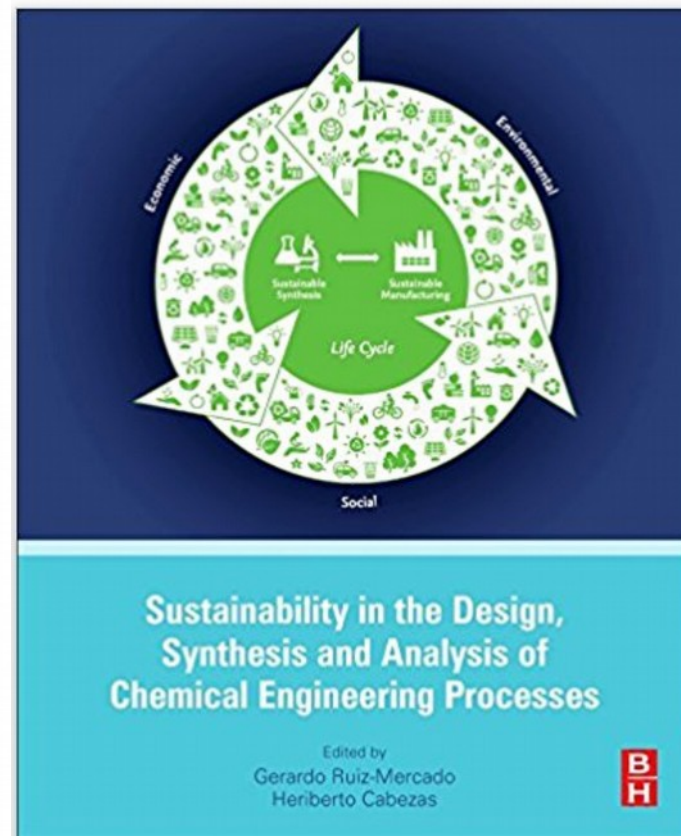
Sustainability in the Process Industry: Integration and Optimization

by Klemes, Ferenc, Bulatov,
and Varbanov

Published by McGraw-Hill



**Sustainability in the Design,
Synthesis and Analysis of
Chemical Engineering
Processes 1st Edition**
by Mercado and Cabezas
Published by Butterworth-
Heinemann



P-graph Software: EPCON Symphony

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen

Implementation of the synthesis algorithms

- EPCON International (Houston)

The screenshot displays the Symphony software interface. The main window shows a process flowsheet with various units including reactors, a desolver, a centrifugal separator, a cooler, and a filter. An 'About Symphony' dialog box is open, featuring a red star logo and the text 'ENGINEER'S AIDE SYMPHONY™'. Below the dialog box, a table lists the input and output streams.

#	Input	Flow/Unit	#	Output	Flow/Unit
1	NaOH	275.00 lb/hr	1	F-NaCl-TEA-TKE	2,519.00 lb/hr
2	CCl3SCl	712.00 lb/hr			
3	Phtalimide	552.00 lb/hr			
4	Triethylamine	330.00 lb/hr			

Vaaler Award: EPCON Synphony

- Professional implementation of the synthesis algorithms

- EPCON International
(Houston)

- Software Synphony

- Vaaler Award,

- 1997, New York

"making major contributions toward more efficient and effective operations in plants in the chemical

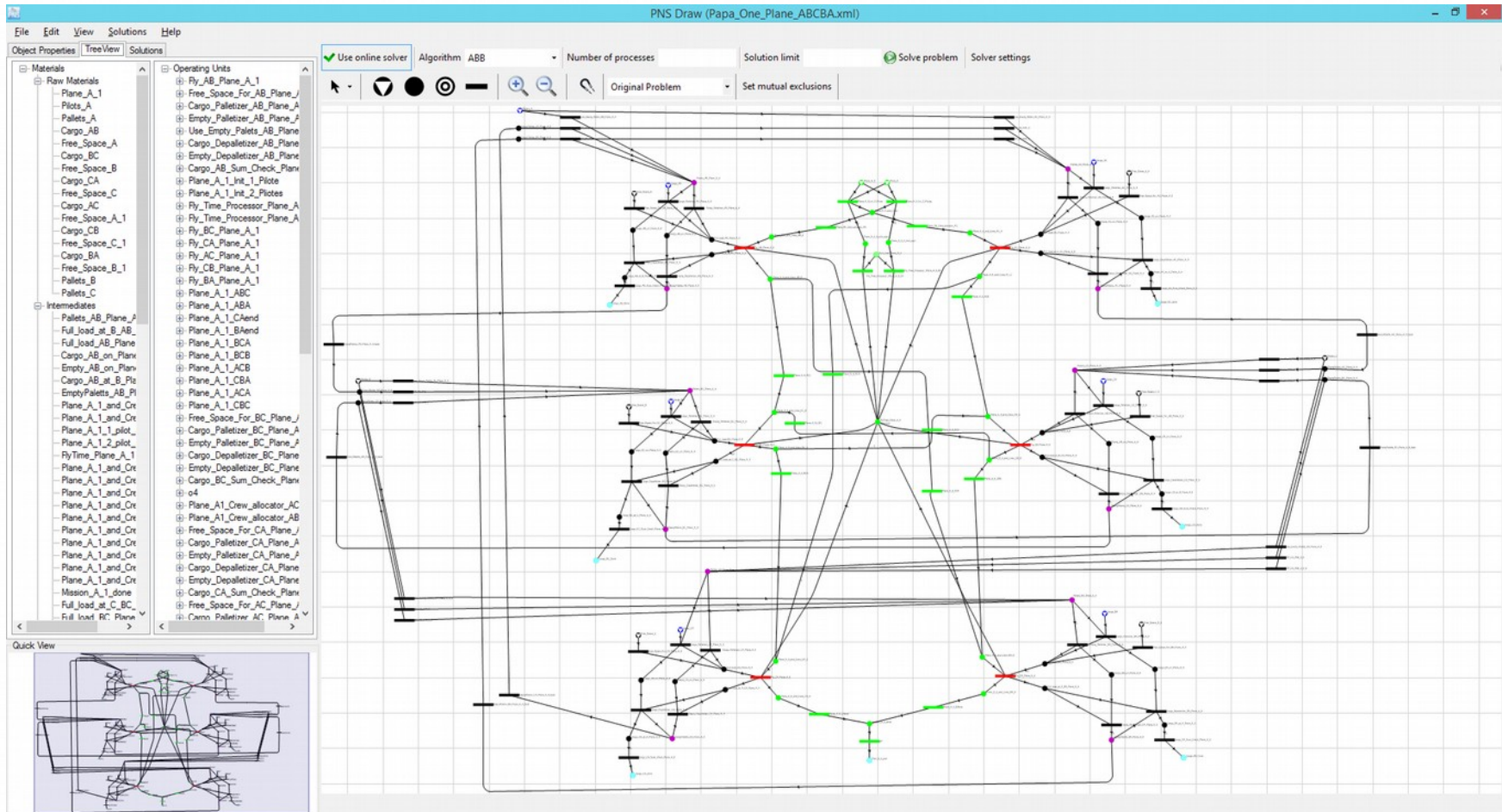
industry"



Software P-graph Studio, 2015- (Available at www.p-graph.org)

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



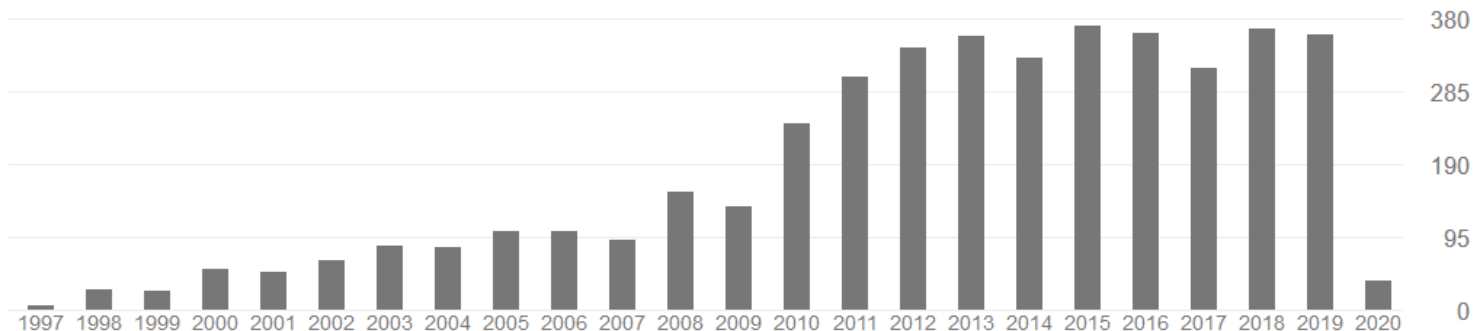
BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Main features

- Process Synthesis and Optimization involving
 - Generating N -best networks
 - Waste treatment
 - Startability analysis
 - Time constrained process synthesis
- MS-Excel import and export
- Graphical export to .png, .jpg, .svg

Publications

- Refereed journal papers: **>200**
- Conference presentations: **>400**
- Citations: **>4500**



Information Sources

p-graph.org

Home

About P-Graph News Education Research Business Downloads Contacts

Graphical Representation

Graphical Representation

One set of nodes (horizontal bars) represents the operating units and the other (solid circles) the material streams. There is no arc between two operating units.

[Read more](#)

On-line Community

LinkedIn Group

Botond Bertok
Associate Professor at University of Pannonia
OWNER

Please find a video on setup and execution of the PNS Studio at http://www.p-graph.com/pns_studio/pns_studio.html

Like Comment | 3

View previous comments

Raymond Tan Thanks, Botond
Like

MEMBERS 18 members

Invite others

Ads You May Be Interested In

- Need urgent loan?**
We bring solutions to your financial stress in 24 hrs .apply now to benefit
- Business Simulations**
Our action-based learning tools will boost your academic programs.
- Targeted Resequencing**
Get unbiased & comprehensive

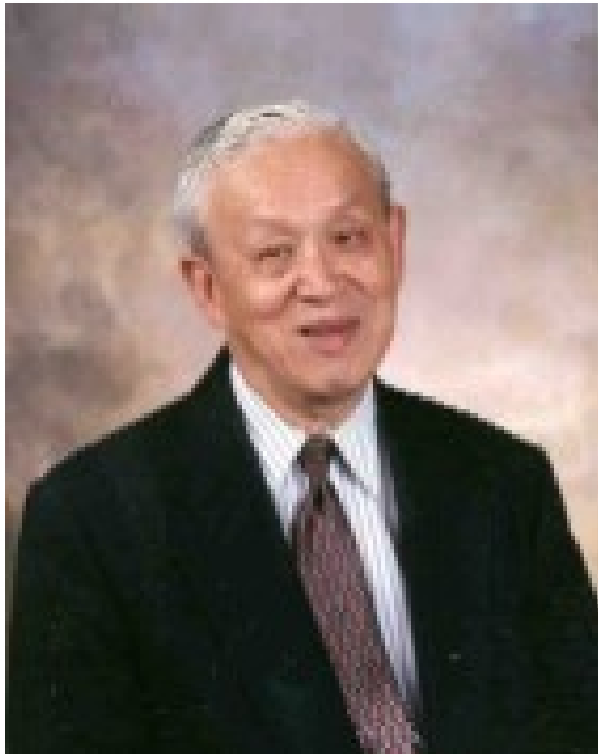
Workshops

EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének együttes javítása a Pannon Egyetemen



In Memoriam



L.T. Fan

University Distinguished Professor
at Kansas State University

and

The Mark H. and Margaret H.
Hulings Chair in Engineering

Thanks you for your attention!

Additional information and free software is available at
p-graph.org



Home

About P-Graph

News

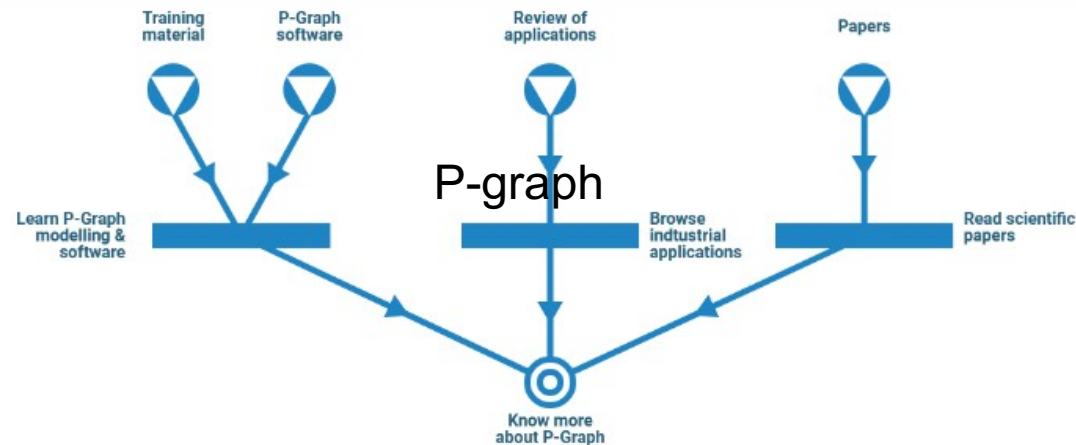
Education

Research

Business

Downloads

Contacts



Resource



Activity



Target

Education

P-Graph is a bipartite graph. One set of nodes (horizontal bars) represents the operating units and the other (solid circles) the material streams.

Research

Referred Journal and Book Articles of the Centre for Advanced Process Optimization.

Business

P-Graph can be used on different industrial and economical areas.



EFOP-3.4.3-16-2016-00009

A felsőfokú oktatás minőségének és hozzáférhetőségének
együttes javítása a Pannon Egyetemen

**THANK YOU FOR
YOUR
ATTENTION!**

SZÉCHENYI 2020

2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió

Európai Strukturális
és Beruházási Alapok



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE