

**UNIVERZA V LJUBLJANI
EKONOMSKA FAKULTETA**

Danijel Kovačič

**EKONOMSKO-OKOLJSKO RAVNOTEŽJE V
RAZŠIRJENI TEORIJI PLANIRANJA MATERIALNIH
POTREB**

Doktorska disertacija

Ljubljana, 2013

IZJAVA O AVTORSTVU

Spodaj podpisani Danijel Kovačič, študent Ekonomske fakultete Univerze v Ljubljani, izjavljam, da sem avtor doktorske disertacije z naslovom EKONOMSKO-OKOLJSKO RAVNOTEŽJE V RAZŠIRJENI TEORIJI PLANIRANJA MATERIALNIH POTREB, pripravljene v sodelovanju s svetovalcema ddr. Ludvikom Bogatajem in dr. Marijo Bogataj.

Izrecno izjavljam, da v skladu z določili Zakona o avtorskih in sorodnih pravicah (Ur. l. RS, št. 21/1995 s spremembami) dovolim objavo doktorske disertacije na fakultetnih spletnih straneh ter objavo bibliografskih podatkov z abstraktom v mednarodnih bazah disertacij. Fakulteta zadrži pravico uporabe doktorske disertacije (teksti in objavljeni rezultati) v izobraževalne namene v okviru fakultete.

S svojim podpisom zagotavljam, da

- sta predloženi tiskana in elektronska verzija besedila doktorske disertacije istovetni;
- je predloženo besedilo rezultat izključno mojega lastnega raziskovalnega dela;
- je predloženo besedilo jezikovno korektno in tehnično pripravljeno v skladu z Navodili za izdelavo zaključnih nalog Ekonomske fakultete Univerze v Ljubljani, kar pomeni, da sem
 - poskrbel, da so dela in mnenja drugih avtorjev oziroma avtoric, ki jih uporabljam v doktorski disertaciji, citirana oziroma navedena v skladu z Navodili za izdelavo zaključnih nalog Ekonomske fakultete Univerze v Ljubljani, in
 - pridobil vsa dovoljenja za uporabo avtorskih del, ki so v celoti (v pisni ali grafični obliki) uporabljena v tekstu, in sem to v besedilu tudi jasno zapisal;
- se zavedam, da je plagiatorstvo – predstavljanje tujih del (v pisni ali grafični obliki) kot mojih lastnih – kaznivo po Zakonu o avtorskih in sorodnih pravicah (Ur. l. RS, št. 21/1995 s spremembami);
- se zavedam posledic, ki bi jih na osnovi predložene doktorske disertacije dokazano plagiatorstvo lahko predstavljalo za moj status na Ekonomski fakulteti Univerze v Ljubljani v skladu z relevantnim pravilnikom.

Datum zagovora: 6. 2. 2013

Predsednica: prof. dr. Liljana Ferbar Tratar

Svetovalka: prof. dr. Marija Bogataj

Član: prof. ddr. Janez Usenik

V Ljubljani, dne 23. 10. 2012

Podpis doktoranda: _____

EKONOMSKO-OKOLJSKO RAVNOTEŽJE V RAZŠIRJENI TEORIJ PLANIRANJA MATERIALNIH POTREB

POVZETEK

Teorija planiranja materialnih potreb je v akademskih krogih široko uveljavljena pri proučevanju proizvodno-skladiščne problematike. Proizvodne strukture opisuje s pomočjo input-output matrik, njihove časovne zakasnitve pa vključuje s pomočjo Laplaceove transformacije v frekvenčni prostor. Takšen model omogoča vrednotenje proizvodnih sistemov z vidika izračuna neto sedanje vrednosti. Teorija v svoji razširjeni obliki poleg proizvodnih aktivnosti vključuje tudi distribucijske, potrošne in reciklažne aktivnosti. Razširjena teorija planiranja materialnih potreb je tako eno izmed redkih orodij, ki lahko obravnava in vrednoti celostne oskrbovalne verige, pri čemer še vedno izhaja iz mikroekonomskih temeljev, saj na najnižjem nivoju opazuje vsako posamično celico aktivnosti sistema.

Razširjena teorija planiranja materialnih potreb lahko torej obravnava sisteme tudi z vidika širše vključitve okoljske problematike, kar proučujemo in dokazujemo v doktorski disertaciji. Takšno proučevanje je smiselno, saj predstavljajo obremenitve okolja, ki so neposredna ali posredna posledica naraščajočega povpraševanja po končnih izdelkih, širšemu krogu raziskovalcev enega izmed glavnih izzivov pri poizkusih ohranjanja dolgoročne vzdržnosti gospodarstev. Okoljska komponenta je torej bistvena sestavina sodobnih oskrbovalnih verig in predstavlja integralni del razširjene teorije planiranja materialnih potreb.

V raziskovalnem delu doktorske disertacije tako prikazujemo, da je celostne oskrbovalne verige z različnimi razporeditvami celic aktivnosti mogoče zapisati v posplošeni obliki vhodno-izhodnih matrik, kar predstavlja ključni temelj za nadaljnje poglobljene analize. Materialne tokove znotraj takšnih sistemov lahko zapišemo na različne načine, ki se razlikujejo predvsem v globini informacij, ki jih vsebujejo. Najpodrobnejši zapis omogoča sledenje vsakemu posamičnemu elementu s kateregakoli nivoja kosovnice skozi več zaporednih ciklov, pri čemer stopnje reciklaže določajo obseg povratnih vstopov elementov nazaj v proizvodnjo. Stopnje reciklaže so odvisne od lokacije reciklažnih celic aktivnosti, zato dajemo prostorski komponenti v raziskovalnem delu poseben poudarek. Obseg reciklažnih aktivnosti na določeni lokaciji je pogojen s parametri, ki jih vključujemo s pomočjo proizvodnih funkcij, in zakonodajo. Kot pomemben okoljski dejavnik v model uvedemo tudi energijo, ki igra z okoljskega vidika pomembno vlogo tako v obliki vhoda kot tudi izhoda sistema. Prikažemo, da lahko visoke cene energentov posamično oskrbovalno verigo silijo k njihovi racionalnejši izrabi. Obravnavamo izgube sistema, ki so lahko odpadek ali pa neposredno onesnaževanje okolja.

Za lažje razumevanje razširitev modela uporabimo numerične primere, v zaključnem delu pa na njih izvedemo nekaj simulacij, s katerimi pokažemo, da je tovrstna celostna obravnava oskrbovalnih verig mogoča in da daje odgovore na različna ekonomsko-okoljska vprašanja tako na mikro kot tudi na makro ravni. Postavljeno hipotezo in teze, ki izhajajo iz nje, v celoti potrdimo. Razširjena teorija planiranja materialnih potreb je torej učinkovito in uporabno orodje za vključitev obravnave okoljskih dejavnikov v oskrbovalne verige.

Ključne besede: razširjena teorija planiranja materialnih potreb, input-output analiza, neto sedanja vrednost, oskrbovalne verige, povratna logistika

ECONOMIC-ENVIRONMENTAL BALANCE IN THE EXTENDED MRP THEORY

SUMMARY

MRP theory has been widely researched and improved upon over the last quarter of a century. This theory is a scientific approach to the well-known Material Requirements Planning (MRP), which has been implemented for several decades. MRP has enjoyed economic success in several economic systems, and Orlicky (1975) provided inspiration for scientific observation. Basic MRP theory addresses multistage, multiperiod production and inventory systems. Multistage assembly systems of MRP are usually graphically presented with a Bill of Materials (BOM). This structure can be presented in a more compact network description using Gozinto graphs. The MRP assembly system can also be conveniently written using Leontief's input-output matrices. Input-output analysis uses a mathematical language for proper description of product structures, which makes it one of the main pillars of the theory. Lead time is another important pillar of MRP theory. Adding timing properties to the physical structure of the elements in the system allows us to observe the complete structure of the product. The incorporation of lead times into MRP theory has been accomplished by using Laplace transform. MRP theory was recently extended to model global supply chains, including reverse logistics. Every production cycle is followed by distribution, consumption and recycling activities. In broad supply chains, transportation costs between pairs of activity cells have a significant impact on the overall net present value (NPV) of the system. Such extension of the model is called Extended MRP Theory (EMRP). Extended model represents a theoretically appropriate tool for finding the right balance between waste and reused items.

The results of recycling activities are recovered and waste items. Recovered items can be reused several times in future production cycles, reducing the need to purchase new items on the market. Waste items must be disposed of, requiring environmental taxes. Recovered items must be distributed from the recycling facility back to production, and waste items must be sent to landfills. This process requires the expenditure of human resources, and energy at each activity cell plays an important role. The location of recycling facilities, the energy needed and the environmental taxes can drastically influence the NPV for the entire system. In some cases, energy can be recovered during the recycling or decomposition processes at the landfills. Recovery of the energy can be stimulated with subsidized purchase prices, but generally, lower quality energy can be expected as an output of these processes. Since the importance of reverse logistics is increasing, this doctoral thesis focuses on above mentioned parameters which determine NPV for the entire system, depending on the geographical location of recycling facilities. We show how lead times, transportation costs, setup costs and price of labour and energy of individual location contribute to the overall NPV of the system. We introduce generalized input and output energy matrices, which describe these energy flows and their impact on environmental sustainability through the NPV of the system.

At each activity cell a certain percentage of scraps is produced and sent for recycling after undergoing quality control. We present an input-output model which includes all possible flows into a recycling sub-system with several stages of recycling. The model is presented in two different ways which differ in terms of precision. The first approach differentiates only between two different flows for each assembled component, where the first one goes to higher production, distribution or consumption levels inside the system, and the second one goes directly to recycling sub-system. This makes the system relatively simple and understandable, but on the other hand it loses the history of the components belonging to certain items. The

major benefit of the second approach is its detailed structure of the product according to original and recycled components. Details of the second model could be helpful in conducting further analyses dealing with questions like: how many times and on how many levels has the component been recycled? However, such model becomes extremely complex when the number of assembly levels and the number of components on any of these levels increase. This complexity becomes especially evident in large systems; therefore, it is more appropriate for simpler systems or separate parts of complex systems. The first approach is much more transparent and should be used in all cases where observation of the system as a whole and evaluation of its NPV are the main priorities, and detailed information is not required.

The complexity of the presented model increases with the introduction of new parameters. Optimal energy use is determined by production functions, which influences optimal return rates from individual material flows in the system. The return rate directly affects the reuse of elements and consequently the revenue part of the NPV for the system, which is also affected by taxation of the disposal of waste elements. The quantity of input and output energy is strongly connected to these factors, and it is the subject of market prices and subsidies for the energy. Observation of such a complex system becomes difficult from an analytical perspective. We introduce some basic simulations for a better understanding of the entire model and the correlations between individual parameters. This way we prove that the model is usable for all possible combinations of supply chains with an infinite number of activity cells. We test our model through simple practical application which serves as a basis for further deeper analyses of company's wide product line and supply chain.

The research work of this doctoral thesis proves that extended MRP theory is a useful tool for observing the wider aspects of environmental issues in global supply chains. Decision-making should not be isolated to individual activity cell alone. Global observation of the complete supply chain is crucial for understanding the impact of all externalities on the quality of living on the planet. Pollution can outweigh the positive effects of the supply chain, meaning that the system becomes uneconomical after considering the environmental factors. In such a case, a negative NPV will show inefficiency in the supply chain and its negative influence on the quality of living in general. The presented model allows for the observation of behaviour for each single entity at the lowest level of the supply chain. Using this approach, the losses and gains in both the economy and the environment could be evaluated more accurately considering all individual flows in the system. No other approach has proven as successful in compound supply systems as input-output analysis and Laplace transforms.

Keywords: *Extended MRP Theory (EMRP), Input-Output Analysis, Net Present Value (NPV), supply chains, reverse logistics*

KAZALO

Uvod.....	1
Strnjena predstavitev problematike	1
Predmet raziskovanja, namen in cilji doktorske disertacije	3
Struktura doktorske disertacije	6
1 Okoljska problematika	8
1.1 Predstavitev ozadja in zakonodaje	8
1.2 Pregled dosedanjih znanstvenih prispevkov s področja okoljske problematike	11
2 Teorija planiranja materialnih potreb in metodologija dela	22
2.1 Razvoj teorije planiranja materialnih potreb.....	22
2.2 Input-output analiza	27
2.3 Osnovne enačbe teorije planiranja materialnih potreb.....	30
2.4 Dosedanja vključitev okoljskega vidika v teorijo planiranja materialnih potreb.....	39
2.5 Simulacije.....	48
3 Nadgradnja modela in simulacije	51
3.1 Vključitev vseh podsistemov osnovnega modela	51
3.1.1 Zapis vhodne matrike v splošni obliki	53
3.1.2 Zapis izhodne matrike v splošni obliki	56
3.1.3 Zapis neto proizvodnje v splošni obliki	61
3.1.4 Prikaz modela na numeričnem primeru	62
3.1.5 Vključitev časovnih zakasnitev in izračun neto sedanje vrednosti	67
3.1.6 Razširjeni numerični primer z vključitvijo časovnih zakasnitev in izračunom neto sedanje vrednosti celotnega sistema	75
3.1.7 Vpliv prostorskih in tehnoloških dejavnikov na izbiro lokacije reciklažnih celic aktivnosti	84
3.1.8 Razširjeni numerični primer z vključitvijo tehnoloških parametrov posamične celice aktivnosti.....	95
3.2 Vključitev montažnega sistema na nivoju proizvodnega podsistema.....	99
3.2.1 Navidezni tokovi znotraj oskrbovalne verige proizvodnega podsistema.....	101
3.2.2 Izgube proizvodnje in njihova obravnava znotraj razširjenega modela.....	110
3.3 Združitev modela z vključenimi vsemi tokovi.....	117
3.3.1 Zapis vhodne matrike v splošni obliki	118
3.3.2 Zapis izhodne matrike v splošni obliki	121
3.3.3 Zapis neto proizvodnje v splošni obliki	123
3.3.4 Prikaz modela na numeričnem primeru	124
3.4 Testiranje modela s pomočjo simulacij.....	129
3.4.1 Proučevanje na podlagi numeričnega primera	129
3.4.2 Primer praktične aplikacije – proizvodnja otroške hrane.....	145
4 Predstavitev in analiza rezultatov.....	153
4.1 Interpretacija rezultatov	153
4.2 Prispevek in omejitve doktorske disertacije.....	156
4.3 Možnosti za nadaljnje raziskovanje	157
Sklep.....	159
Literatura in viri	161

UVOD

STRNJENA PREDSTAVITEV PROBLEMATIKE

Ekološki dejavniki so v zadnjih desetletjih vse bolj pomembni, kar je tesno povezano s tehnološkim razvojem družbe, rastjo prebivalstva in posledično naraščajočo potrošnjo. S temi spremembami se spopadajo številne direktive in zakoni tako na globalni ravni kot tudi na nacionalnih in lokalnih ravneh. Evropska zakonodaja postaja tako vedno strožja glede ponovne uporabe oziroma reciklaže izrabljenih izdelkov in učinkovite rabe energije. Teorija planiranja materialnih potreb (angl. *Material Requirements Planning Theory* oziroma *MRP Theory*) kljub svojemu dolgoletnemu razvoju šele v zadnjem času vključuje tudi problem tokov povratne logistike (M. Bogataj & Grubbström, 2011b; Grubbström, M. Bogataj & L. Bogataj, 2007), s čimer pušča odprto široko raziskovalno področje. Ta doktorska disertacija temelji na predhodnih delih s področja teorije planiranja materialnih potreb, v njej pa ta proces posplošujemo na vse fizično mogoče tokove v sistemu in dodatno vključujemo energijo kot enega od okoljsko izredno pomembnih dejavnikov. Doktorska disertacija se tako spopada s podrobnejšo raziskavo materialnih in energetskega tokov v razširjeni teoriji planiranja materialnih potreb in njihovim vplivom na celotno oskrbovalno verigo, s čimer aktivno prispeva k raziskovanju ekonomsko-okoljskega ravnotežja, ki postaja vedno pomembnejša komponenta sodobnega družbeno-ekonomskega sveta.

Razvoj Grubbströmove teorije planiranja materialnih potreb je vsebinsko motiviralo Orlickyjevo pionirsko delo (Orlicky, 1975), njeno izhodišče pa predstavlja input-output¹ analiza (Leontief, 1928, 1951, 1966), pri čemer vključuje časovne zakasnitve s pomočjo Laplaceove transformacije v frekvenčni prostor. Zaradi splošne uveljavljenosti temelji pričujoče raziskovalno delo na input-output modelu štirih osnovnih podsistemov celotne oskrbovalne verige (Grubbström et al., 2007), kar imenujemo razširjena teorija planiranja materialnih potreb:

- 1) proizvodnja,
- 2) distribucija,
- 3) potrošnja,
- 4) reciklaža.

V razširjeni teoriji planiranja materialnih potreb predstavimo vhodne zahteve sistema $\mathbf{x}$ kot:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{11} & \mathbf{H}_{12} & \cdots & \mathbf{H}_{1n} \\ \mathbf{H}_{21} & \mathbf{H}_{22} & \cdots & \mathbf{H}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{H}_{m1} & \mathbf{H}_{m2} & \cdots & \mathbf{H}_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 \\ \mathbf{P}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{P}_n \end{bmatrix} = \mathbf{HP} \quad (1)$$

¹ Angleški izraz »input-output« je v besedni zvezi »input-output analiza« splošno uveljavljen tudi v slovenskem jeziku, zato ga uporabljamo tekom celotne doktorske disertacije.

$\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \dots, \mathbf{P}_n$ predstavljajo gostote tokov proizvodnje, distribucije ter potrošnje in reciklaže, $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_m$ pa vhodne zahteve po predmetih, potrebnih za proizvodni in distribucijski proces ter potrošnjo in reciklažo. $\mathbf{H}$ je vhodna matrika (angl. *input matrix*), sestavljena iz več podmatrik. V primeru proučevanja celostne oskrbovalne verige iz štirih osnovnih podsistemov vedno velja $m = n = 4$. Podmatrike $\mathbf{H}_{ij}$ so njene pripadajoče vhodne podmatrike in se nanašajo na potrebe po komponentah, ki jih zahteva podsistem i pri izvajanju procesa neposredno v podsistemu j . Večina podmatrik $\mathbf{H}_{ij}$ ima v realnem svetu vrednost 0, saj med posamičnimi podsistemi ne obstajajo neposredne povezave: v realnosti se dejanski materialni tokovi ne pojavljajo na vseh teoretično mogočih relacijah.

Podobno kot vhodne zahteve sistema definiramo tudi izhodne tokove iz sistema $\mathbf{y}$, pri čemer je izhodna matrika (angl. *output matrix*) $\mathbf{G}$ podobno kot vhodna matrika sestavljena iz več podmatrik $\mathbf{G}_{kl}$:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{y}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{11} & \mathbf{G}_{12} & \cdots & \mathbf{G}_{1n} \\ \mathbf{G}_{21} & \mathbf{G}_{22} & \cdots & \mathbf{G}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{G}_{m1} & \mathbf{G}_{m2} & \cdots & \mathbf{G}_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 \\ \mathbf{P}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{P}_n \end{bmatrix} = \mathbf{GP} \quad (2)$$

Neto proizvodnjo sistema predstavlja razlika med izhodnimi in vhodnimi tokovi sistema:

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_1 \\ \mathbf{z}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{z}_m \end{bmatrix} = \mathbf{y} - \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{y}_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_m \end{bmatrix} = (\mathbf{G} - \mathbf{H})\mathbf{P} \quad (3)$$

Neto proizvodnjo (prosti tok elementov) izračunamo na nivoju vsakega izmed posamičnih štirih podsistemov, kar predstavimo z vektorji $\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \dots, \mathbf{z}_m$. Predstavljeni input-output model je tako temeljno izhodišče raziskovalnega dela doktorske disertacije. Druga pomembna komponenta so časovne zakasnitve, ki jih v model vključujemo s pomočjo Laplaceove transformacije. Pri proučevanju proizvodno-reciklažnih aktivnosti, ki vključujejo tudi energetske problematiko, se opiramo na proizvodne funkcije Cobb-Douglasovega tipa, predstavljeni model pa dopušča obravnavo tudi z uporabo proizvodnih funkcij drugih tipov.

V doktorski disertaciji opisani model nadgradimo, tako da obravnavamo vse fizično dovoljene tokove med posamičnimi podsistemi. Pri tem izpostavimo tudi vprašanje sledenja posamičnih elementov, ki ciklično krožijo v sistemu do njihove dokončne odložitve na deponijo. Velik poudarek dajemo proizvodnemu podsistemu, ki temelji na osnovni teoriji planiranja materialnih potreb. Dovoljujemo tudi izhodne tokove v reciklažni podsistem oziroma izgube z

vseh ravni proizvodnje z ustreznim upoštevanjem multiplikacijskih faktorjev. V razširjeni model vključimo tudi navidezne tokove, pri katerih pretok informacij med dvema celicama aktivnosti ni pogojen z dejanskim materialnim tokom. V model vpeljemo še energijo kot enega izmed ekoloških dejavnikov, ki pomembno vpliva na celostno ekonomsko-ekološko ravnotežje sistema kot celote.

V raziskovalnem delu doktorske disertacije dokažemo, da je razširjeni model planiranja materialnih potreb mogoče zapisati v splošni obliki. Prikazujemo dva mogoča pristopa pri tovrstni splošni predstavitvi, ki se razlikujeta v količini informacij, ki jih zajemata, posledično pa tudi v stopnji zahtevnosti modela. Ekonomsko vrednotenje modela izvajamo s pomočjo izračuna neto sedanje vrednosti sistema. V doktorski disertaciji proučujemo vpliv reciklažnih aktivnosti na neto sedanjo vrednost sistema, pri čemer so ključni dejavniki lokacija reciklažnih obratov ter z njo povezani transportni stroški, stroški delovne sile in stroški energije.

PREDMET RAZISKOVANJA, NAMEN IN CILJI DOKTORSKE DISERTACIJE

Glavni predmet raziskovanja doktorske disertacije je model celostne oskrbovalne verige z vključenim reciklažnim podsistemom, ki deluje na več nivojih (obratne) kosovnice. Izdelki ne vstopajo v podsistem reciklaže samo zaradi potrošnih aktivnosti ob zaključku svojega življenjskega cikla, torej po izrabi s strani končnega potrošnika. Ta predpostavka sistem poenostavlja, saj zanemara pomemben vpliv industrijskih in transportnih aktivnosti na okolje. V realnosti namreč ni mogoče pričakovati, da bodo vsi proizvedeni izdelki prispeli do končnih potrošnikov. Izdelki se lahko uničijo, pokvarijo ali izrabijo že v zgodnejših fazah, torej na nižjih nivojih sistema. Pomembno vlogo imajo tudi ostanki in odpadki proizvodnje, ki so eden od ključnih dejavnikov onesnaževanja okolja. V realnosti je smiselno, da v input-output modelu s štirimi osnovnimi procesi, že prej upoštevamo vstop v proces reciklaže, in sicer iz:

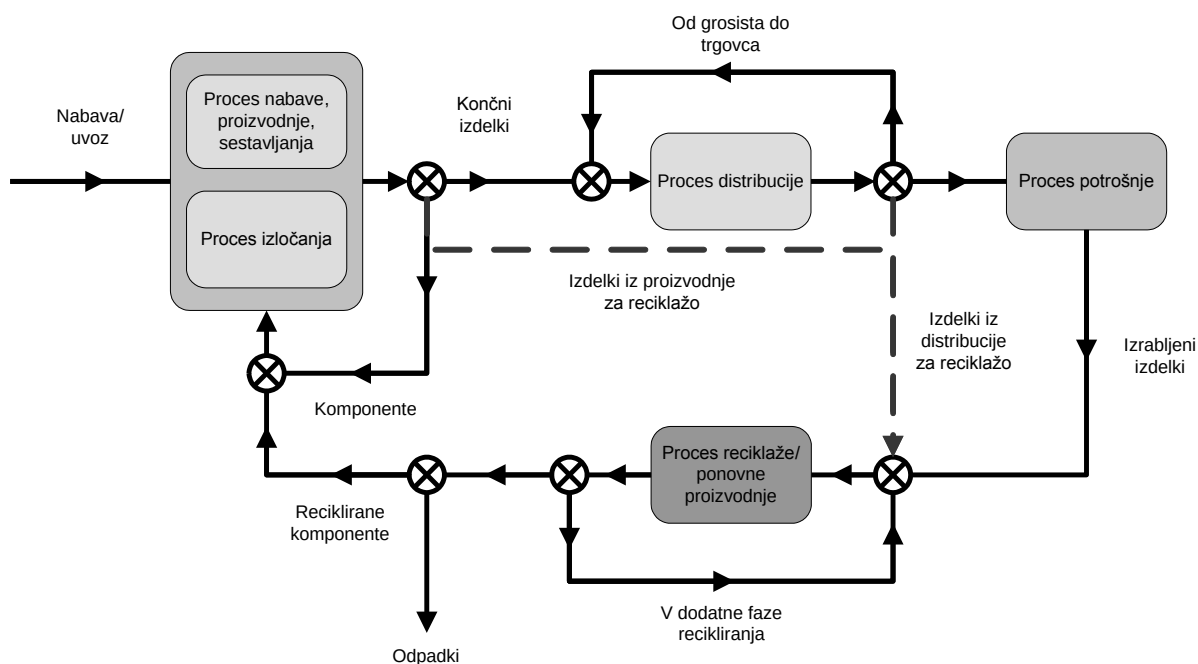
- 1) procesa proizvodnje: neprodani izdelki (presežna proizvodnja), nekvalitetni izdelki (izdelki, ki ne dosegaajo zadostnih kakovostnih standardov in so posledično neprimerni za prodajo na tržišču), poškodovani izdelki (izdelki, ki se poškodujejo v času skladiščenja oziroma jim preteče rok uporabe);
- 2) procesa distribucije: neprodani izdelki (presežna distribucija), poškodovani izdelki (izdelki, ki se poškodujejo v procesu distribucije oziroma jim preteče rok uporabe v času distribucije).

Takšno razširitev modela prikazujemo v shematični obliki na Sliki 1.

V raziskovalnem delu doktorske disertacije se ukvarjamo s podrobno analizo izhodov iz proizvodnega podsistema, ki temelji na metodologiji planiranja materialnih potreb, v podsistem reciklaže. Pri proizvodnem podsistemu elemente, ki prihajajo z nižjega nivoja (surovine oziroma komponente), na višjem nivoju sestavljamo v nove elemente (komponente oziroma končni proizvodi). Nove elemente uporabimo bodisi za nadaljnje proizvodne

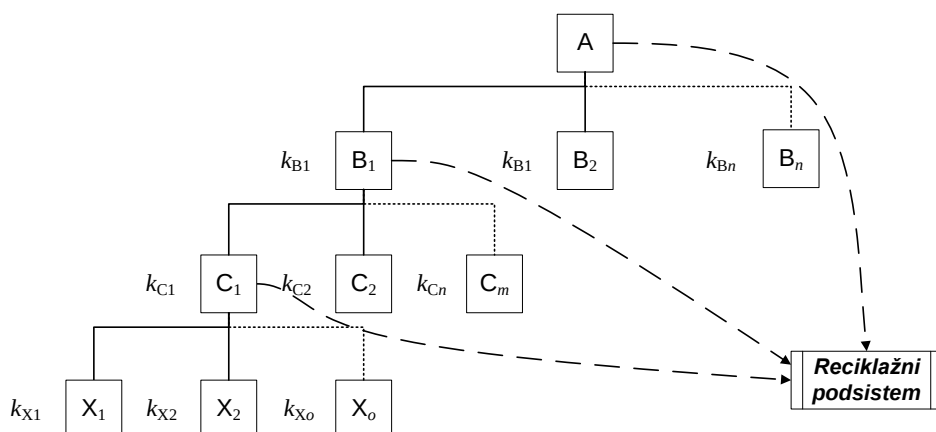
aktivnosti bodisi jih iz proizvodnje izločimo. To pomeni, da lahko iz procesa proizvodnje neposredno v proces reciklaže preide komponenta s kateregakoli montažnega nivoja sistema, kar prikazujemo na Sliki 2.

Slika 1: Dopolnitev modela za vstop izdelkov v proces reciklaže neposredno iz produkcijskega in distribucijskega procesa



Vir: prirejeno po R.W. Grubbström, M. Bogataj in L. Bogataj, A compact representation of distribution and reverse logistics in the value chain, 2007, str. 25.

Slika 2: Tokovi iz proizvodnega v reciklažni proces na primeru splošnega montažnega sistema



Z vidika povratne logistike razširimo osnovni model tako, da lahko poleg končnega proizvoda A v reciklažni podsistem vstopajo tudi njegove sestavne komponente s kateregakoli nivoja B, C, ..., X. Kompleksnost takšnega modela je pogojena s številom nivojev kosovnice (angl. *Bill*

Of Materials oziroma *BOM*), saj lahko vsako nižje ležečo komponento pridobimo z ekstrakcijo iz katerekoli od višje ležečih komponent, pri čemer se lahko razlikujejo stopnje reciklaže za vsak možen izvor reciklaže komponente. Stopnja reciklaže elementov na nižji ravni s preходом na višje ravni praviloma pada ali ostaja enaka, saj se z vsakim preходом na višje ležečo celico aktivnosti praviloma poveča verjetnost modifikacije komponente v tolikšni meri, da je povratno pridobivanje (recikliranje) njenih sestavnih elementov dodatno oteženo.

V modelu, prikazanem na Sliki 1, lahko obravnavamo materialni tok na nivoju posamičnega cikla. To predpostavko je mogoče razširiti tako, da obravnavamo splošni model, v katerem posamični element kroži v sistemu vse do trenutka izstopa, ko svoj krogotok zaključi na deponiji. Takšno sledenje elementov nam daje možnost podrobnejšega vpogleda v dogajanje znotraj oskrbovalne verige in dodatne možnosti za poglobljene analize.

Pomemben ekološki dejavnik, ki ga dodatno vpeljujemo v model, je energija. Energija se porablja pri izvajanju aktivnosti znotraj posamičnih celic aktivnosti. V določenih primerih jo lahko pridobivamo s pomočjo reverzibilnih procesov znotraj reciklažnega podsistema, kar je mogoče regulirati z ustrezno okoljsko politiko preko subvencioniranega odkupa enote energije, pri čemer igra pomembno vlogo tudi njena pojavnost oblika in posledično kvaliteta.

Na podlagi zgornje predstavitve predmeta raziskovanja in namena doktorske disertacije lahko poglobilni cilj raziskovalnega dela predstavimo s **temeljno hipotezo**:

Sodobna teorija planiranja materialnih potreb, ki jo je zgradil Grubbström in jo razširil skupaj z L. Bogatajem in M. Bogataj, je primerna podlaga za obravnavo ekonomsko-okoljskega ravnotežja v oskrbovalni verigi.

V okviru temeljne hipoteze doktorske disertacije bomo ustrezno nadgradili obstoječi model teorije planiranja materialnih potreb in potrdili naslednje **hipoteze**:

- 1) *Obstoječa vključitev reciklažnega podsistema v teorijo planiranja materialnih potreb omogoča proučevanje tokov, povezanih z reciklažo, in jo je mogoče uporabiti tudi v širšem pomenu obravnave ekonomsko-okoljskega ravnotežja.*
- 2) *Poleg toka iz proizvodnje na trg je treba za ugotavljanje ekonomsko-okoljskega ravnotežja proučevati tudi tok iz proizvodnega in distribucijskega procesa v reciklažni podsystem.*
- 3) *Znotraj proizvodnega podsistema je treba za ugotavljanje ekonomsko-okoljskega ravnotežja obravnavati neposredni tok v reciklažni podsystem tudi na nivoju elementov s katerekoli stopnje montažnega ali distribucijskega podsistema. Ravnotežje je mogoče ugotavljati preko proizvodnih funkcij Cobb-Douglasovega tipa.*

- 4) *V okviru razširjenega modela je mogoče obravnavati izgube sistema. Izgube sistema so tisti elementi, ki nikdar ne zaključijo cikla, torej nikdar ne vstopijo v proces reciklaže, ampak se izgubijo v kateremkoli od predhodnih procesov, praviloma na deponiji.*

Zapis osnovnega modela v razširjeni splošni obliki je relativno kompleksen, zato za nazornejšo predstavitev uporabimo numerične primere, s čimer dodatno preverimo njegovo pravilnost, hkrati pa bralcu omogočimo lažje razumevanje procesov, ki se odvijajo znotraj njega. Poleg študije analitičnega modela je zaradi kompleksnosti smiselno izvesti tudi simulacije, s čimer omogočimo podrobnejšo predstavitev in analizo rezultatov obnašanja modela in njegove občutljivosti na spremembo posamičnih parametrov.

STRUKTURA DOKTORSKE DISERTACIJE

Doktorsko disertacijo delimo v več smiselno zaključenih samostojnih sklopov. V uvodu na kratko predstavljamo ozadje raziskovalnega dela ter raziskovalne namene in cilje, ki so zajeti v temeljni hipotezi in njenih hipotezah.

V prvem poglavju predstavljamo ozadje okoljske problematike. S predstavitvijo ključne zakonodaje in direktiv s področja ravnanja z odpadki in reciklaže potrjujemo smiselnost znanstvene obravnave okoljske problematike, ki je v povezavi z razširjeno teorijo planiranja materialnih potreb ključni predmet te doktorske disertacije. Ker obstaja obsežna zbirka znanstvenih prispevkov s področja raziskovanja okoljskih dejavnikov, predstavljamo predvsem tiste, ki se navezujejo na problematiko reciklaže, energije in drugih raziskav, ki temeljijo na input-output analizi in teoriji planiranja materialnih potreb.

Drugo poglavje vsebuje pregled dosedanjih del s področja teorije planiranja materialnih potreb, ki predstavlja izhodišče raziskovalnega dela doktorske disertacije. Predstavitev temeljev teorije in njenega razvoja je ključna za razumevanje prispevka disertacije k njeni razširitvi. Kratkemu kronološkemu pregledu razvoja teorije sledi formulacija treh njenih bistvenih komponent:

- 1) input-output analize,
- 2) Laplaceove transformacije in
- 3) izračuna neto sedanje vrednosti.

V nadaljevanju poglavja razčlenjujemo dosedanja dela s področja integracije teorije planiranja materialnih potreb z okoljskim vidikom ter dela s področja simulacij in njihove analize rezultatov.

Tretje poglavje vsebuje raziskovalni prispevek, s katerim potrjujemo hipoteze, postavljene v uvodnem poglavju. Vključitev vseh podsistemov osnovnega modela predstavljamo v splošni obliki zapisa input-output modela in jo preverjamo s pomočjo numeričnih primerov. Vključujemo tudi časovne zakasnitve, ki skupaj s transportnimi stroški predstavljajo osnovo

za izračun neto sedanje vrednosti celotnega sistema. Posebno pozornost namenjamo podsistemu reciklaže, ki ga raziskujemo tudi z vidika upoštevanja proizvodnih funkcij, ki omogočajo vpeljavo dodatnih parametrov v model. Na ta način kot pomemben okoljski dejavnik v model vpeljujemo energijo, ki preko proizvodnih funkcij, cene in tehničnih zmožnosti njenega povratnega pridobivanja bistveno vpliva na ravnotežje celotnega sistema. Razširjeni model teorije planiranja materialnih potreb v splošni obliki razširjamo še z navideznimi tokovi, pri katerih materialni tok zaobide določeno celico aktivnosti, skozi katero pa kljub temu še vedno teče informacijski tok. Vključitev vseh podsistemov osnovnega modela predstavljamo še z alternativnim pristopom, pri katerem spremljamo vse tokove sistema skozi več ciklov. S tem omogočimo sledenje posamičnemu elementu sistema skozi več zaporednih ciklov, kar se odraži v razširjenih možnostih ocenjevanja sistema, vendar bistveno poveča tudi njegovo kompleksnost. Na koncu poglavja preverjamo obnašanje postavljenega modela s simulacijami, s katerimi opazujemo vpliv spremembe posamičnega parametra na celoten sistem.

Četrto poglavje je namenjeno diskusiji. S predstavitvijo rezultatov potrjujemo temeljno hipotezo in vse njene hipoteze. Opisujemo tudi omejitve raziskovalnega dela ter možnosti za njegovo nadaljnje podrobnejše analiziranje in nadgrajevanje. Doktorsko disertacijo smiselno zaključujemo s sklepom.

1 OKOLJSKA PROBLEMATIKA

1.1 PREDSTAVITEV OZADJA IN ZAKONODAJE

Odpadki so rezultat urbanizacije, industrializacije in potrošnje, vendar je še pred tremi desetletji njihov vpliv na razvoj sodobne družbe podcenjen. Razvoj družbe, predvsem v deželah tretjega sveta, in rast prebivalstva namreč povzročata nenehno rast odpadnih izdelkov in polizdelkov. Glede na podatke Evropske komisije samo znotraj Evropske unije letno proizvedemo 3 milijarde ton odpadkov, od tega 90 milijonov ton nevarnih odpadkov (European Commission – Environment, 2012).

Politike spopadanja s problemi onesnaževanja so na lokalnih, regionalnih in nacionalnih ravneh različne, na globalni ravni pa se problema onesnaževanja loteva Kjotski protokol (United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC, 1997), katerega cilj je znižanje emisij toplogrednih plinov. Že pred Kjotskim protokolom je bil sprejet tudi Montrealski sporazum (United Nations Environment Programme – UNEP, 1987) o postopnem zmanjševanju in prenehanju uporabe ozonu nevarnih snovi. Na ravni Evropske unije pa Bela knjiga o okoljski odgovornosti (Commission of the European Communities, 2000) izpostavlja, da ekonomski subjekti ne smejo gledati na naravno okolje kot na javno dobrino, opisuje odgovornosti in ukrepe za preprečevanje z okoljem povezanih sprememb, ki vplivajo na kvaliteto življenja ljudi in drugih živih bitij, ter izpostavlja pomen varovanja naravnega okolja. Organizacija za gospodarsko sodelovanje in razvoj v svoji Okoljski strategiji za prvo desetletje 21. stoletja (Organisation for Economic Co-operation and Development – OECD, 2001) opredeljuje štiri kriterije zagotavljanja okoljske vzdržnosti, ki temeljijo na obnavljanju naravnih virov in surovin ter stopnji onesnaževanja, ki jo okolje še lahko prenese:

- 1) regeneracija,
- 2) nadomestljivost,
- 3) asimilacija in
- 4) izogibanje nepovratnosti.

Šesti akcijski okoljski program Evropske unije za obdobje 2002-2012 (European Parliament, Council, 2002) podaja poglobljeno analizo medsebojnih vplivov različnih okoljevarstvenih vidikov, s svojo strateško usmerjenostjo pa želi vplivati na zdravje ljudi in okolja. Strategije so razdeljene na naslednja tematska področja:

- 1) zrak,
- 2) preprečevanje odpadkov in reciklaža,
- 3) morsko okolje,
- 4) zemlja,
- 5) pesticidi,
- 6) naravni viri in

7) urbano okolje.

Na tem mestu moramo izpostaviti pomen strategije preprečevanja odpadkov in njihovega recikliranja, katere namen je zniževanje količine odpadkov in povečevanje stopenj reciklaže, kar je v neposredni povezavi z raziskovalnim delom te doktorske disertacije. Namen te dolgoročne strategije je, da pomaga Evropi preiti v družbo recikliranja (European Parliament, Council, 2008), ki odpadke uporablja kot vire, s čimer aktivno prispeva k dolgoročni vzdržnosti in trajnostnemu razvoju. Strategija preprečevanja odpadkov in njihovega recikliranja (Commission of the European Communities, 2005) razkriva, da je med letoma 1990 in 1995 količina vseh odpadkov porasla za 10 %, medtem ko je BDP porasel za 6,5 %. Strategija izpostavlja, da je treba večino aktivnosti za zniževanje odpadkov izvajati na nacionalni, regionalni in lokalni ravni. Obstoječe stopnje reciklaže lahko povečamo z ekonomskimi instrumenti in ustreznimi okoljskimi dajatvami, pomembna pa je tudi odgovornost proizvajalca pri izvajanju reciklažnih aktivnostih znotraj celotnega življenjskega cikla izdelka.

Evropska unija daje velik poudarek reciklaži in ponovni uporabi, saj predstavljata eno izmed treh temeljnih načel upravljanja z odpadki (European Commission – Environment, 2012):

- 1) zniževanje količine odpadnih snovi,
- 2) reciklaža in ponovna uporaba ter
- 3) učinkovito uravnavanje končnih odpadnih snovi.

V ta namen je sprejetih več direktiv s področja problematike upravljanja odpadkov, reciklaže in ponovne uporabe. Ločene so po vsebinskih sklopih odpadkov:

- 1) Baterije in akumulatorji: direktiva 2006/66/EC (European Parliament, Council, 2006c) določa ukrepe za minimalen vpliv baterij in akumulatorjev na okolje, pri čemer temelji na merljivih rezultatih stopenj zbiranja in reciklaže.
- 2) Biološko razgradljivi odpadki: cilj direktive 1999/31/EC (Council of the European Union, 1999) je 35-odstotno znižanje biološko razgradljivih odpadkov do leta 2016 glede na leto 1995.
- 3) Elektronska oprema: direktiva 2002/95/EC (European Parliament, Council, 2003a) definira omejitve uporabe škodljivih komponent pri sestavi elektronske opreme, direktiva 2002/96/EC (European Parliament, Council, 2003b) pa njeno zbiranje in reciklažo. Področje ponovne uporabe odpadne elektronske opreme in njihove reciklaže je še posebej pereče, ker veliko izrabljenih izdelkov nelegalno zapusti območje Evropske unije in konča na deponijah držav tretjega sveta, kjer so regulatorni mehanizmi ohlapnejši.
- 4) Izrabljena vozila: direktiva 2000/53/EC (European Parliament, Council, 2000) definira načine ponovne uporabe sestavnih delov izrabljenih vozil in njihove reciklaže. Med drugim jasno določa stopnjo reciklaže: najkasneje do 1. 1. 2015 je treba zagotoviti povečanje reciklaže vsaj do 85 % povprečne teže vozila.
- 5) Rudarjenje: direktiva 2006/21/EC (European Parliament, Council, 2006a) definira načine odstranjevanja neuporabnega materiala pri izkopavanju rudnega bogastva.

- 6) Embalaža: direktiva 94/62/EC (European Parliament, Council, 1994) definira zmanjševanje odpadkov, ki nastanejo pri embaliranju izdelkov. Določa tudi načine ponovne uporabe embalaže oziroma njene reciklaže.
- 7) Polivinil (v nadaljevanju PVC): problematiko PVC opisuje Zelena knjiga o okoljskih vplivih PVC (Commission of the European Communities, 2000).
- 8) Odpadna blata in vode: direktiva 91/271/EEC (Council of the European Communities, 1991) določa načine upravljanja odpadnih voda, Direktiva 86/278/EEC (Council of the European Communities, 1986) pa definira načine uporabe odpadnih blat v kmetijske namene brez škodljivih vplivov na okolje.
- 9) Razstavljanje ladij: razstavljanje ladij spada pod okrilje Baselske konvencije (United Nations Environment Programme – UNEP, 1989), ki določa nadzor prehoda nevarnih odpadkov preko meja in njihovega odstranjevanja. Zakon 1013/2006 (European Parliament, Council, 2006b) državam članicam Evropske unije prepoveduje izvoz odsluženih ladij v države tretjega sveta, s čimer se omejuje nekontrolirano in neekološko razstavljanje ladij na območjih, kjer to tehnološko ni podprto v zadostni meri.
- 10) Odpadna olja: direktiva 75/439/EEC (Council of the European Communities, 1975) definira načine zbiranja, shranjevanja, obnove in uničenja odpadnih olj, ki z ekološkega vidika predstavljajo veliko nevarnost.

V Sloveniji je temeljni predpis s področja okoljske problematike Zakon o varstvu okolja (Ur. l. RS, št. 41/2004; v nadaljevanju ZVO-1) ki v točki 5.4. tretjega člena definira ravnanje z odpadki: »Ravnanje z odpadki je zbiranje, prevažanje, predelava in odstranjevanje odpadkov, vključno z nadzorom teh ravnanj in ukrepi po prenehanju delovanja naprave za ravnanje z odpadki.« Po ZVO-1 je povzročitelj onesnaževanja odgovoren za predelavo nastalih odpadkov oziroma njihovo odstranitev, ko ta tehnološko ali ekonomsko ni mogoča. Prvi bistveni podzakonski akt je Pravilnik o ravnanju z odpadki (Ur. l. RS, št. 84/1998), ki v 9. členu opredeljuje, da morajo biti odpadki predelani, če obstajajo tehnične možnosti za predelavo in možnosti uporabe predelanih odpadkov. Odpadkov ni treba predelovati, če:

- 1) so stroški predelave odpadkov nesorazmerno višji od stroškov njihove odstranitve ali
- 2) odstranjevanje odpadkov manj obremenjuje okolje kot njihova predelava.

ZVO-1 je hkrati ena izmed podlag Resolucije o nacionalnem programu varstva okolja (Ur. l. RS, št. 2/2006), ki določa ključne okoljske cilje in prednostne naloge, ki temeljijo na oceni stanja okolja in prevladujočih trendov, ter je usmerjena v zagotavljanje trajnostnega razvoja. Cilji resolucije temeljijo na prej opisanih direktivah Evropske unije s področja upravljanja z odpadki. Eden izmed ciljev je doseči 60% masni delež predelave odpadne embalaže do konca leta 2012, pri čemer so jasno definirane ciljne stopnje reciklaže po posamičnih vrstah odpadnih materialov.

Izvore odpadkov (Žaja, 2002) lahko razdelimo v štiri glavne skupine:

- 1) industrijski odpadki,

- 2) odpadki storitvenih dejavnosti,
- 3) odpadki trgovske dejavnosti in
- 4) gospodinjski odpadki.

Glavni ponori proizvedenih odpadkov so:

- 1) objekti predelave odpadkov,
- 2) objekti odstranjevanja (deponiranja) odpadkov in
- 3) prodaja odpadkov na tuje trge.

Med izvorom in ponorom se lahko odpadki začasno zadržujejo v prehodnih deponijah; govorimo o organiziranih sistemih zbiranja:

- 1) odjemna mesta,
- 2) zbiralnice ločenih frakcij in
- 3) zbirni centri.

Opadki, ki jih lahko recikliramo ali deponiramo na odlagališčih, torej izvirajo iz vseh stopenj oskrbovalne verige. Njihov tranzit pa običajno poteka skozi različne zbiralne sisteme. Te predpostavke so tudi eden od temeljev raziskovalnega dela te doktorske disertacije, v katerem proučujemo vse fizično mogoče tokove z vidika celostnih oskrbovalnih verig.

1.2 PREGLED DOSEDANJIH ZNANSTVENIH PRISPEVKOV S PODROČJA OKOLJSKE PROBLEMATIKE

Za optimalno ravnanje z odpadki v kompleksnejših sistemih potrebujemo ustrezno orodje za podporo odločitvam. Zasnova, izgradnja in implementacija takšnih orodij pa sodi v področje operacijskih raziskav. Odločitvene modele delimo na tiste, ki so v podporo odločitvam na makro nivoju, in tiste, ki so v podporo odločitvam pri upravljanju oskrbovalnih verig, ki vključujejo tudi skrb za okolje. Obe vrsti modelov pogosto slonita na klasični input-output analizi, ki jo poznamo predvsem iz Leontiefovih del (1928, 1951, 1966) pri obravnavi medregionalnih tokov in ki jo Leontief (1970) nadgradi tudi za potrebe makroekonomske okoljevarstvene problematike.

Okoljska problematika, ki jo med drugim obravnavajo v prejšnjem podpoglavju opisani zakoni in direktive, je v široki meri znanstveno raziskovana. Vpliv eksternalij na splošno blaginjo družbe prvi izpostavi Pigou (1920). Pigoujev davek tako odpravlja neravnovesje med proizvodnjo in njenim vplivom na okolje ter splošno družbeno blaginjo. Negativni Pigoujev davek lahko interpretiramo kot subvencijo za okoljsko koristno ravnanje ekonomskih subjektov, ki ga stimulirajo regionalne politike. Pigoujev davek je vsebinsko smiselno vključen v razširjeno teorijo planiranja materialnih potreb znotraj cenovnega vektorja $\mathbf{p}$ kot dajatev ali kot subvencija.

Da so surovine v naravi količinsko omejene, prvič znanstveno proučuje Hotelling (1931). Poudarja, da je rast gospodarstva omejena z razpoložljivimi neobnovljivimi naravnimi viri, njihovo prehitro trošenje pa ima lahko negativen vpliv na ekonomsko ravnotežje v

prihodnosti. Za zagotavljanje ravnotežja potrebujemo regulatorne mehanizme in po Hotellingovem mnenju je cena naravnih surovin primerno orodje za omejevanje njihove potrošnje in dolgoročno vzdržnost ekonomskega sistema. Hotellingovo delo ostane dolga leta prezrto in njegovo pravilo, ki predvideva eksponentno rast cen naravnih surovin, se ne izkaže za povsem pravilno. Kljub temu pa služi v kasnejših obdobjih kot inspiracija za podrobnejše raziskave s področja neobnovljivih naravnih virov in njihove ponovne uporabe.

Raziskovanje okoljske problematike doživi skokovito rast v drugi polovici 20. stoletja. V nadaljevanju predstavljamo nekaj izbranih novejših prispevkov, s katerimi potrjujemo pomembnost proučevanja te problematike in ki v veliki meri služijo kot inspiracija pri vključevanju okoljske komponente v teorijo planiranja materialnih potreb.

Thierry, Salomon, van Nunen in van Wassenhove (1995) povratno logistiko podrobneje razdeljujejo v več podskupin, s katerimi pokrivajo različno obravnavo izrabljenih izdelkov ob koncu njihovega življenjskega cikla:

- 1) neposredna ponovna uporaba,
- 2) preprodaja,
- 3) popravilo,
- 4) obnova,
- 5) ponovna proizvodnja,
- 6) kanibalizacija in
- 7) reciklaža.

Zgornje kategorije lahko smiselno združimo v tri krovne skupine:

- 1) ponovna uporaba: vrnjen izdelek lahko večkrat ponovno uporabimo v njegovi izvorni obliki (npr. steklena embalaža, palete ipd.),
- 2) obnova: vrnjen izrabljen izdelek s tehnološkim procesom obnovimo in nato uporabimo v njegovi izvorni obliki (npr. avtomobilski deli, elektronska oprema ipd.),
- 3) reciklaža: ponovno uporabimo sestavne elemente vrnjenega izdelka, vendar pri tem ne ohranimo njegove izvirne oblike (npr. papir, plastika, kovine ipd.).

V raziskovalnem prispevku doktorske disertacije se sicer osredotočamo na pojem reciklaže, vendar s tem iz modela ne izključujemo obravnave obnove in ponovne uporabe. Kot je razvidno iz modela, predstavljenega v tretjem poglavju, se osredotočamo na popolno razstavljanje vhodnih elementov reciklažnega podsistema, kar dosežemo z obratno kosovnico. Predstavljeni model lahko tako razumemo in obravnavamo tudi v smislu ponovne uporabe ali obnove, in sicer s skrčenjem obratne kosovnice, ki se odraza v parametrih izhodne matrike. Na tak način pa s predstavljenim modelom pokrijemo celoten spekter obravnave izrabljenih izdelkov. Zaradi poenostavitve v raziskovalnem prispevku disertacije uporabljamo izključno izraz reciklaža, saj predstavlja najgloblji nivo razstavljanja in je kot tak tudi najkompleksnejši.

Proizvajalci končnih izdelkov že v fazi razvoja izberejo tehnologijo, ki ob koncu življenjskega cikla definira stopnjo obnovljivosti posamičnih komponent. Problem v takšni

trgu prepuščen izbiri tehnologije se pogosto odraža v tem, da proizvajalci in inovatorji niso motivirani za investicije v razvoj tehnologij, s katerimi bi zagotovili obnovljivost komponent. Takšno obnašanje je prav tako posledica strahu pred vstopom sekundarnih proizvajalcev, ki lahko z obnavljanjem komponent prevzamejo del tržnega deleža primarnega proizvajalca (Bernard, 2011). Obnavljanje izrabljenih proizvodov pa prinaša številne pozitivne vplive za celotno družbo, med katere sodijo prihranki naravnih virov in energije, manjša količina odpadkov, nižje cene proizvodov ter v določenih primerih višji dobički. Izbor tehnologije, usmerjene v obnovljivost virov, prav zaradi splošnih družbenih koristi ne sme biti prepuščen primarnim proizvajalcem. Regulatorni mehanizmi, ki določajo minimalne stopnje obnovljivosti, običajno zvišajo ceno proizvodnje posamičnih komponent, to breme pa se prenese na končnega potrošnika. Bernard v določenih primerih kot alternativo regulatornim mehanizmom predlaga sistem, ki temelji na dogovoru posamičnih akterjev, s čimer lahko dosežemo večjo družbeno korist in večje dobičke posamičnih akterjev v oskrbovalni verigi.

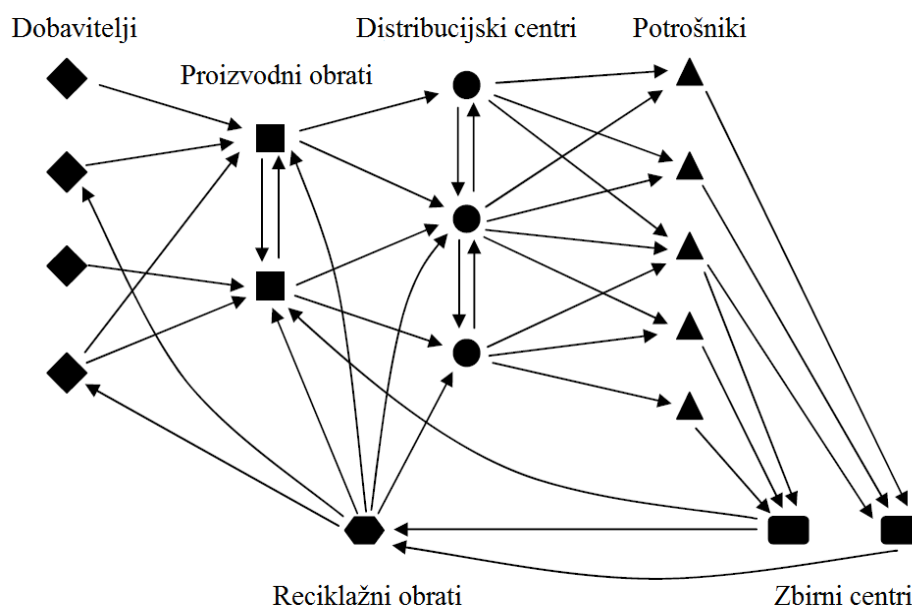
Ferrer in Ayres (2000) opisujeta pozitivne makroekonomske učinke ponovne uporabe, ko s pomočjo input-output analize proučujeta njen vpliv na primeru francoskega gospodarstva. Ponovna uporaba namreč vpliva na strukturo vhodov v posamični proizvodni sektor (surovine, delovna sila, energija), s čimer igra pomembno vlogo z vidika makroekonomskega položaja gospodarstva. Industrijski sektorji s povečanjem ponovne uporabe nadomestijo delovno silo in transportne aktivnosti, ki so sicer potrebne za primarno proizvodnjo, temelječo na naravnih virih (surovinah). Na podlagi input-output analize Ferrer in Ayres identificirata tri pozitivne makroekonomske dejavnike, ki so rezultat aktivnosti ponovne uporabe izrabljenih proizvodov:

- 1) ponovna uporaba povečuje neto povpraševanje po delovni sili,
- 2) aktivnosti ponovne uporabe zmanjšujejo število potrebnih medindustrijskih transakcij,
- 3) vzpostavitev konkurenčnega okolja med dobavitelji in sektorjem ponovne uporabe zmanjšuje število transakcij dobaviteljev osnovnih surovin.

Ob predpostavki, da se povpraševanje z vpeljavo ponovne uporabe ne spremeni, lahko sklepamo, da vodita večje povpraševanje po delovni sili in zmanjšanje števila potrebnih transakcij v bolj učinkovito ekonomsko okolje. Ekonomsko okolje, v katerem je prisotna ponovna uporaba, je lahko učinkovitejše že brez upoštevanja pozitivnih ekoloških koristi, ki jih prinaša takšno ravnanje.

V preteklem stoletju je prostorska umestitev celic aktivnosti oskrbovalnih verig slabo raziskana. M. Bogataj (1996) najprej poveže teorijo zalog z lokacijsko teorijo, v naslednjih letih pa se s pomenom lokacije znotraj oskrbovalnih verig ukvarja vedno več raziskovalcev (Melo, Nickel & Saldanha-da-Gama, 2009). Na sliki 3 prikazujemo shematičen prikaz celostne oskrbovalne verige s povratno logistiko in prostorsko komponento, ki omenjenim raziskavam služi kot osnova.

Slika 3: Različni akterji oskrbovalne verige, katerih celice aktivnosti so na različnih lokacijah znotraj celotne mreže



Vir: M.T. Melo, S. Nickel in F. Saldanha-da-Gama, *Facility location and supply chain management - A review*, 2009, str. 402.

Melo, Nickel in Saldanha-da-Gama (2009) objavijo obsežen pregleden članek pomembnejših raziskovalnih del s področja prostorske umestitve celic aktivnosti celostnih oskrbovalnih verig. Naraščajočo pomembnost izbora lokacije dokazujejo s strmim naraščanjem števila raziskovalnih del v preteklem desetletju. Znotraj celostnih oskrbovalnih verig je namreč vedno bolj izpostavljena tudi pomembnost optimalne izbire lokacije reciklažnih obratov. Te odločitve pa so tesno povezane z zakonodajo in privlačnostjo posamičnega okolja, ki je pogojena z okoljskimi dajatvami, subvencijami, razvitostjo transportne mreže in transportnimi stroški. Ti dejavniki prav tako bistveno vplivajo na model, ki ga raziskujemo v tej doktorski disertaciji.

Optimalno prostorsko umestitev reciklažnih obratov s svojim matematičnim modelom proučuje Di Vita (2001). Razvitejše države lahko namreč z izvozom odpadkov dvignejo svoj prihodek in splošni življenjski standard, države v razvoju pa lahko predvsem na račun cenejše delovne sile odpadke reciklirajo bistveno bolj ekonomično ter na ta način povečajo zaposlenost prebivalstva, kar se odraža v dvigu splošnega življenjskega standarda. Kot naslednji pomemben dejavnik, ki bistveno determinira stopnje reciklaže, avtor izpostavlja tehnološko razvitost. Izboljšujemo jo lahko z ustreznimi investicijami v razvoj, večji delež recikliranih elementov pa pripomore k znižanju izrabe neobnovljivih virov surovin. Di Vita posredno poudarja tudi pomen globalizacije in pomembnost reciklaže v globalnih oskrbovalnih verigah, kjer določamo optimalno lokacijo posamične celice aktivnosti na podlagi tehnoloških parametrov znotraj posamičnega mikro okolja.

Hunhammar (1995) poda analizo materialnih tokov znotraj cikličnega modela, ki sestoji iz proizvodnje, potrošnje in reciklaže. V svojem delu ugotovi, da proizvodne aktivnosti ustvarjajo ostanke v višini dvakratnika teže končnih proizvodov ob koncu življenjskega cikla, ki izstopijo iz potrošnje. S tem dokazuje, da reciklažne aktivnosti ne smejo biti omejene zgolj na proizvode končnih potrošnikov, temveč je treba znotraj oskrbovalnih verig opazovati ostanke, ki so rezultat vsake posamične celice aktivnosti v mreži. Hunhammar poudarja pomen transportnih zahtev, do katerih pride pri prehodu iz linearnih sistemov v ciklične sisteme, ki temeljijo na ponovni uporabi in reciklaži. Ključno vprašanje, ki ga izpostavlja avtor, je vprašanje morebitnega prenosa obremenjevanja okolja s strani odpadkov na stran onesnaževanja, zaradi dodatnih transportnih aktivnosti, do katerih pride zaradi uvedbe cikličnih procesov. Avtor ne poda celostnega odgovora na to kompleksno vprašanje, poda pa dobro izhodišče, ki je med drugim tudi predmet proučevanj razširjene teorije planiranja materialnih potreb in te doktorske disertacije.

Tang, Grubbström in Zanoni (2007) obravnavajo model sistema, v katerem se nova komponenta začne proizvajati v tistem trenutku, ko reciklaža te komponente ne zadovolji kriterijev za ponovno uporabo. Pri tem upoštevajo predpostavko o stohastičnosti časovne zakasnitve pri reciklaži stare in izdelavi nove komponente ter stroške držanja enote zaloge in stroške za primer nezaloženosti. Model, za katerega je predstavljena ustrezna optimalna rešitev, je primeren za upravljanje reciklažno-proizvodnega procesa komponent, katerih cena je visoka, proces reciklaže oziroma proizvodnje pa zahteven.

Pri raziskovanju okoljske problematike v smislu reciklaže in ponovne uporabe se pogosto uporabljajo odločitveni modeli, ki temeljijo na obravnavi izdelkov ob koncu njihovega življenjskega cikla (angl. *End-of-Life* oziroma *EoL*). Nakamura in Kondo (2006) tako s pomočjo input-output analize odpadkov modelirata sistem, s katerim proučujeta stroškovno upravičenost različnih alternativ ravnanja z odpadno elektronsko opremo ob koncu njenega življenjskega cikla, ki je zaradi stroge zakonodaje z vidika njene reciklaže oziroma ponovne uporabe še posebej problematična. Gehin, Zwolinski in Brissaud (2008) pa ugotavljajo, da zgolj reciklaža ne zadostuje za vzpostavitev okoljskega ravnotežja. Izpostavijo pomen vključevanja strategij konca življenjskega cikla že v zgodnjih fazah projektiranja izdelkov, s čimer lahko dosežemo višjo stopnjo obnovljivosti. Williams et al. (2007) proučujejo optimalno ravnotežje reciklaže različnih materialov izrabljenih avtomobilov in svoje modele preverijo tudi s senzitivnostno analizo ob spremembi cene kovin na sekundarnem trgu.

V mnogih primerih je ob koncu življenjskega cikla smotrnejša ponovna uporaba kot pa čista reciklaža (Lee, Cho & Hong, 2010). Pri razstavljanju izdelka na njegove sestavne komponente ob koncu njegovega življenjskega cikla je poleg maksimalnega prihodka bistven tudi celoten strošek procesa ponovne uporabe. Lee et al. (2010) zato v enovitem modelu združijo prihodke ob koncu življenjskega cikla in stroške ponovne uporabe. Kot sestavni del stroškovne strukture upoštevajo tudi okoljske dajatve, ki so vezni člen med ekonomskim in okoljskim interesom znotraj obravnavanega okolja. V svojem modelu za predstavitev struktur

namesto kosovnice uporabijo graf HALG (angl. *Hierarchical Attributed Liaison Graph*), ki vključuje hierarhično strukturo izdelkov (Dong, Zhang, Tong & Dong, 2006). Tudi Mitra in Webster (2008) proučujeta pomen državnih podpor in njihov vpliv na odločitve, ki so rezultat omenjenih modelov. Iz njunih izsledkov je razvidno, da zviševanje podpor povečuje konkurenčno prednost predelovalcev pred izdelovalci.

Pomemben prispevek na področju raziskovanja okoljske problematike v srednjeevropskem prostoru dodata Dobos in Richter. Dobos (1998, 1999) se v svojih zgodnejših delih ukvarja predvsem z upravljavskimi strategijami, povezanimi s proizvodno-skladiščnimi odločitvami, pri katerih so emisijske stopnje količinsko omejene ali pa se zanje plačujejo okoljske dajatve. Svoje raziskave razširi na za tiste čase aktualno uvedbo trgovanja z emisijskimi kuponi (Dobos, 2005), ki so tesno povezani s filozofijo Pigoujevih davkov. V svoje proizvodno-skladiščne modele kot pomemben člen vpelje tudi povratno logistiko (Dobos, 2003). Dobos in Floriska (2008) s pomočjo Leontieffovega input-output modela z makroekonomskega vidika proučujeta pozitivne vplive povratne logistike na rast celotnega gospodarstva ter vpliv reciklažnih aktivnosti na izrabo neobnovljivih naravnih virov (Dobos & Floriska, 2007). Znižanje ravni potrošnje in rasti gospodarstva namreč posledično zniža črpanje neobnovljivih naravnih virov, vpeljava reciklažnih aktivnosti pa se ob nespremenjenem ali celo zmanjšanem črpanju neobnovljivih naravnih virov odrazi v rasti gospodarstva in potrošnje. Za razliko od porabe neobnovljivih virov lahko porabo obnovljivih naravnih virov nadzorujemo s kontrolirano potrošnjo ali povečevanjem obsega obnovljivosti virov. Dobos in Tallos (2011) s pomočjo input-output analize dokažeta, da mora biti stopnja regeneracije naravnih virov vsaj tolikšna, kot je stopnja rasti gospodarstva, saj bodo v nasprotnem primeru obnovljivi naravni viri postali neobnovljivi. Odgovornost politike je torej, da ustrezno kontrolira potrošnjo oziroma skrb za zadostno stopnjo regeneracije naravnih virov, da bi zagotovila dolgoročno vzdržnost sistema.

Schrady (1967) prvi proučuje deterministični model EOQ (angl. *Economic Order Quantity*), ki vključuje povratno logistiko, ne pa tudi stopnje reciklaže kot spremenljivke. Richter (1994) predstavi razširitev modela EOQ z iskanjem ravnotežja med količino obnovljenih in odpadnih komponent. Richter (1996a, 1996b) predstavi še nadaljnje obsežnejše razširitve modela EOQ in podrobne analize rezultatov. Richterjeva (1997) obravnava okoljske problematike, ki temelji na modelu EOQ, se ukvarja z iskanjem strategije za vzpostavitev ravnotežja med dvema bistvenima problemoma, ki ju identificira kot:

- 4) [ECOL $\rightarrow$ ECON]: obravnava ekonomskih posledic, ki so rezultat ekološkega obnašanja,
- 5) [ECON $\rightarrow$ ECOL]: obravnava ekoloških posledic, ki so rezultat pritiskov zaradi ekonomskih aktivnosti.

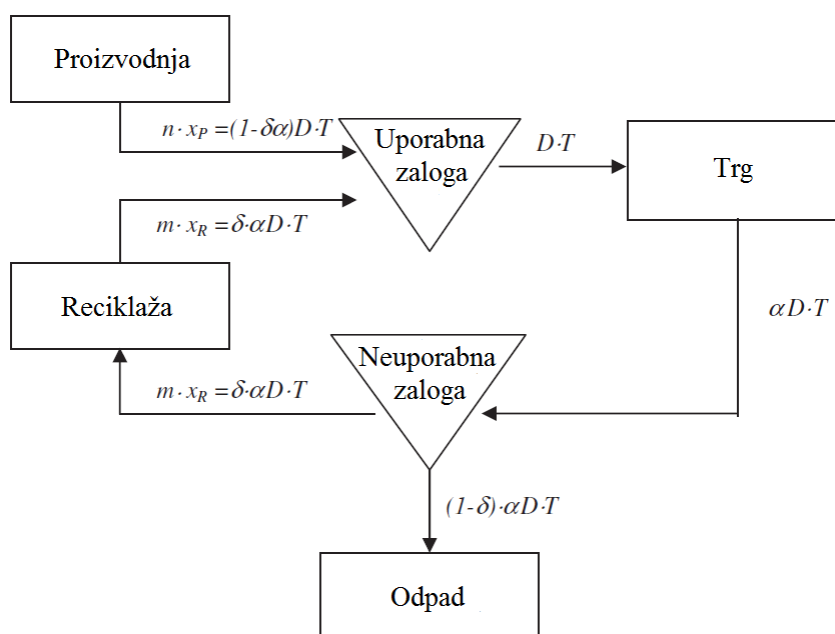
Richter in Dobos (1999) predstavita izsledke te raziskave ob bolj realistični predpostavki celostevilskega sistema znotraj optimalne rešitve zveznega modela EOQ s pomočjo minimalne stroškovne funkcije $G(\alpha, e)$. Ugotovita, da imajo čiste strategije prednost pred mešanimi. Optimalna rešitev je torej znotraj strategije odlaganja odpadkov $\alpha(e) = 0 \vee 1$, pri

čemer je α delež odpadnih elementov in e strošek na enoto odpadnega elementa. Optimalne čiste strategije znotraj problema [ECON $\rightarrow$ ECOL], ki izhajajo iz ekonomske obravnave z uporabo minimizacije stroškov, zaradi tehnoloških omejitev običajno niso mogoče. Tudi Teunter (1998) z uporabo modelov EOQ ter diferenciacijo stroškov držanja zalog za obnovljive in nove izdelke dokaže, da popolna obnovljivost ni mogoča.

Predhodno omenjena dela Dobosa in Richterja temeljijo na predpostavki, da so vsi vrnjeni proizvodi enaki in posledično vsi primerni za obnovo in ponovno uporabo. Kasneje (Dobos in Richter, 2006) to predpostavko ovržeta z diferenciacijo vrnjenih proizvodov po kvaliteti. Dokažeta ekonomsko smiselnost sortiranja izrabljenih proizvodov. Namesto čistih strategij postavita kot optimalno rešitev mešane strategije, pri čemer velja: $0 < \alpha(e) < 1$. V novejših delih (Dobos in Richter, 2003, 2004) pa proučujeta proizvodno-reciklažni model, ki ga prikazujemo na Sliki 4, pomen posamičnih parametrov pa je naslednji:

- 1) n : število proizvodnih kontingentov, ki je pozitivno celo število,
- 2) x_P : velikost proizvodnega kontingenta,
- 3) m : število reciklažnih kontingentov, ki je pozitivno celo število,
- 4) x_R : velikost reciklažnega kontingenta,
- 5) D : stopnja povpraševanja,
- 6) T : dolžina proizvodnega in reciklažnega cikla,
- 7) α : mejna stopnja vrnitve iz potrošnje,
- 8) δ : mejna stopnja uporabnosti.

Slika 4: Dobos-Richterjev proizvodno-reciklažni model



Vir: I. Dobos in K. Richter, *An extended production/recycling model with stationary demand and return rates*, 2004, str. 313.

S pomočjo obratnega Wagner-Whitinovega algoritma (Wagner & Whitin, 1958) in Silver-Meal hevristike (Silver & Meal, 1973) je mogoče določati optimalne časovne intervale, v katerih sprožamo procese obnavljanja izrabljenih proizvodov z nizko končno vrednostjo oziroma procese njihove nove proizvodnje, ter optimalne količine teh intervalov. Richter s soavtorji raziskuje to v svojih nadaljnjih delih (Richter & Sombrutzki, 2000; Richter & Weber, 2001). Richter in Gobsch (2003) pa proučujeta razširitev klasičnih modelov, ki temeljijo na kopičenju zalog, na novodobnejši pojav proizvodnje ravno ob pravem času (angl. *Just-In-Time* oziroma *JIT*).

Da je kvaliteta vrnjenih proizvodov bistvenega pomena za določanje optimalnih stopenj reciklaže, poleg Dobosa in Richterja (2006) proučuje še mnogo drugih raziskovalcev. Pokharel in Liang (2012) vrnjene izrabljene proizvode razredno segmentirata po kvaliteti, ti razredi pa določajo ceno izrabljenih izdelkov, ki se plačujejo zbirnim centrom. Kot ključne odločevalce pri določanju cen izrabljenim izdelkom postavljata ločevalne centre, ki razpolagajo z informacijami o obsegu povpraševanja in ceni na strani reciklažnih obratov. Takšen sistem delovanja ločevalnih centrov je stimulativen za zbirne centre, ki so posledično motivirani za zbiranje odpadnih izdelkov. Ferrer (1997) pri določanju cene obnovljenim (pol)izdelkom kot enega izmed pomembnih dejavnikov izpostavlja tudi časovno komponento. Kot primer navaja računalniško industrijo, pri kateri je vrnjen (pol)izdelek v trenutku zaključka obnovitvenega postopka običajno že zastarel in posledično neprimeren za uporabo na primarnem trgu. Takšne izdelke pa lahko prodamo na sekundarnem trgu ali jih v celoti recikliramo, njihove elementarne sestavne dele pa uporabimo za proizvodnjo drugih, novejših komponent, po katerih še obstaja povpraševanje na primarnem trgu. Izdelke, ki so v trenutku vrnitve v izredno dobrem stanju, lahko v mnogih primerih obnovimo z relativno nizkimi stroški (Östlin, Sundin & Björkman, 2009), ki so pogosto povezani samo s čiščenjem in ponovnim embaliranjem. Po drugi strani so vrnjeni izdelki v slabšem končnem stanju stroškovno izredno potratni z vidika obnovitve in jih je pod določeno kritično mejo bolj smiselno odložiti na deponijo. Pomembna je tudi kvaliteta obnovljenih izdelkov, saj ta pogojuje profitabilnost sistema (Kim, Song, Kim & Jeong, 2006; Teunter & Vlachos, 2002). Obnovljeni izdelki morajo biti namreč za ustrezno ponovno uporabo v večini primerov tako kvalitetni kot novi izdelki.

Pri obravnavi okoljske problematike igra pomembno vlogo energija, ki je predmet širšega raziskovanja znotraj različnih vej znanosti. Že Gibbs (1873) v termodinamiki ločuje tisti del uporabne energije, ki se lahko spremeni v maksimalno koristno delo znotraj sistema. Mednarodno uveljavljeni termin za Gibbsovo uporabno energijo je eksergija (angl. *Exergy*), ki ga v splošno rabo uvede priznani slovenski raziskovalec Zoran Rant (1956). Energijo, ki je ni mogoče pretvoriti v uporabno delo, pa imenuje anergija (angl. *Anergy*). Ker energije ni mogoče uničiti, je vsota eksergije in anergije vedno konstanta, pri čemer se eksergijski del običajno zmanjša z opravljenim delom. Te osnovne fizikalne zakonitosti, ki jih podrobneje opisujeta prvi in drugi zakon termodinamike, so pomembne za razumevanje in pravilno modeliranje sistema te doktorske disertacije. Pri obravnavi energije pa je pomembna tudi

njena kvaliteta, saj vse oblike energije niso enakovredne z vidika praktične uporabnosti. Energijo višje kvalitete, kot je na primer električna energija, lahko skoraj v celoti pretvorimo v delo. Energijo nižje kvalitete, kot je na primer toplotna energija, pa ni mogoče v celoti pretvoriti v eksergijo, saj se je velik del izloči v okolje (anergija). They in Zarate (2009) predstavljata model energijske oskrbovalne verige, v katerem energija nastopa v različnih pojavnih oblikah. Med temi oblikami prihaja do različnih transformacij, pri čemer se spreminja kvaliteta energije in posledično način zadovoljevanja potreb končnih porabnikov.

Z vidika globalnih oskrbovalnih verig, ki so predmet razširjene teorije planiranja materialnih potreb, lahko torej predpostavimo, da je energija potrebna znotraj vsake posamične celice aktivnosti. Znotraj tistih celic aktivnosti, v katerih potekajo proizvodni procesi, je energija potrebna za sestavljanje elementa na višjem nivoju. Eksergijo, ki jo uporabljamo znotraj teh procesov, pa lahko v določeni meri reverzibilno pridobivamo s postopkom razstavljanja znotraj reciklažnih celic aktivnosti. Del energije lahko povratno pridobivamo tudi pri razpadu odpadnih elementov na deponiji, pri čemer je njena kvaliteta običajno nižja, torej je delež eksergije relativno nizek.

Eksergijska analiza je v osnovi tehnične narave. Pomen vpliva tehnoloških dejavnikov na okolje in širšo blaginjo pa opisuje Odum (1971). Negativne vplive na okolje ovrednoti z uporabo t. i. okoljskega računovodstva (Odum, 1996). Okoljsko-energetske vplive proučuje s kvantitativnega in finančnega vidika širša skupina raziskovalcev, ki uporabljajo različne raziskovalne pristope. Sciubba (2003) ponuja z energijskega vidika vsebinsko sorodno interpretacijo modela, kot jo predstavljamo v raziskovalnem delu te doktorske disertacije. V svojem delu, ki se osredotoča na povratno pridobivanje (recikliranje) energije, modelira proces **P**, katerega vhodi so surovine, različne vrste energije, finančni tok (kapital in stroški izvedbe aktivnosti) in delovna sila. Izhodi procesa **P** pa so želeni končni proizvodi ter njihovi stranski proizvodi in odpadki. Ker se tekom procesa **P** velik del eksergije ne izkoristi, je v modelu kot samostojen izhod obravnavana tudi njena izguba v okolje.

Munson (2007) izpostavlja podcenjenost pomena povratnega pridobivanja energije, ki predstavlja pomemben potencial za celostno energetske oskrbo prebivalstva in zmanjševanje negativnih vplivov na okolje. Meni, da so politiki dolgo ignorirali industrijske odpadke kot vir energije. Na nezanemarljiv pomen pridobivanja energije znotraj reciklažnih aktivnostih nazorno opozarja tudi Thormark (2001). V svojem delu proučuje možnosti predelave gradbenih odpadkov na primeru Švedske. Ugotavlja, da je mogoče s toplotno energijo, pridobljeno iz gradbenih odpadkov, letno ogrevati med 180.000 in 220.000 družinskih hiš. Ker gradbeni odpadki nastopajo v relativno velikih količinah, v svoji študiji poudarja tudi pomen lokacij celic aktivnosti, ki nastopajo v procesu povratne logistike (reciklažni obrati, sežigalnice in deponije). Pri tem daje poseben poudarek energiji, ki je potrebna za izvedbo transportnih aktivnosti.

Morris (1996) v svojem raziskovalnem delu ugotavlja, da je z vidika kumulativne porabe energije reciklaža izrabljenih proizvodov smiselna in energetske upravičena. Reciklažne aktivnosti namreč v veliki večini primerov (tj. pri 24 od 25 proučevanih osnovnih industrijskih surovin) zahtevajo vhodno količino energije, za katero velja:

- 1) z reciklažnimi aktivnostmi prihranimo energijo, ki bi bila sicer potrebna za izvedbo procesov pridobivanja osnovnih surovin iz naravnega okolja in procesov njihove transformacije v polizdelke oziroma izdelke, ki jih lahko recikliramo ali obnovimo iz odpadnih ostankov proizvodnje ali potrošnje,
- 2) količina energije, ki jo prihranimo z reciklažnimi aktivnostmi, presega količino energije, ki jo lahko pridobimo s sežiganjem ostankov proizvodnje in potrošnje, pri čemer avtor upošteva tudi energetske potrebe sortiranja in distribucije odpadkov in recikliranih elementov nazaj v proizvodne obrate.

Na energetske potencial različnih materialov opozarja tudi Lea (1996). Kot primer okoljsko problematičnega odpadnega materiala z velikim delom energetske vrednosti, ki jo lahko recikliramo, izpostavlja plastiko. Vsebnost energije, ki jo lahko recikliramo iz odpadnih kovin, pa je po drugi strani zanemarljiva. Johnson, Reck, Wang in Graedel (2008) dopolnjujejo zgornje ugotovitve na primeru jekla, katerega postopek izdelave je energetske izredno potraten. Ugotavljajo, da potrebujemo za pridobivanje jekla iz ostankov samo tretjino električne energije, ki jo porabimo pri izdelavi jekla iz primarnih surovin. Ta ugotovitev z energetskega in posledično širšega okoljskega vidika favorizira reciklažo pred novim ciklom izdelave. Vellini in Savioli (2009) neposredno primerjata okoljske vplive uporabe različnih materialov. Izdelava steklene embalaže iz osnovnih surovin je energetske tako potratna, v postopku izdelave pa se sprošča tolikšna količina škodljivih snovi, da je z okoljskega vidika sprejemljivejša plastična embalaža. Povečevanje stopnje reciklaže steklene embalaže pa ima v nasprotju z njeno primarno izdelavo posledično primerjalno manjši vpliv na okolje, kot ga povzroča plastična embalaža. Iskanje ravnotežja z vidika recikliranja energije je pomemben dejavnik pri ugotavljanju celotnega ravnotežja oskrbovalne verige, kar v razširjeni obliki modela celostne oskrbovalne verige, v kateri je energija zgolj eden od dejavnikov, proučujemo tudi v tej doktorski disertaciji.

Input-output analiza je izredno uporabna tudi za raziskovanje energijskih tokov. Albino, Dietzenbacher in Kühtz (2003) s pomočjo input-output analize modelirajo sistem, s katerim proučujejo materialne in energijske tokove, onesnaževanje okolja in fizične odpadke. Obnovljivost virov, ki vstopajo v proizvodnjo, in povratno pridobivanje energije imajo za pomembne sestavine za zagotavljanje dolgoročnega okoljskega ravnotežja. Chang, Ries in Wang (2011) pa analizirajo gradbeni sektor kitajskega gospodarstva s pomočjo input-output analize in metodologije LCA (angl. *Life Cycle Assessment*), ki omogoča ocenjevanje vplivov na okolje tudi tekom faze potrošnje in ni omejena zgolj na proizvodne, distribucijske in reciklažno-obnovitvene aktivnosti sistema.

V tem poglavju nakazujemo nekaj poglobitnih smeri širokega področja raziskovanja okoljske problematike. Širok spekter tovrstnih raziskav dodatno potrjuje dolgoročno pomembnost okoljskega vprašanja in pomen njegovega nadaljnjega raziskovanja. Ta izhodišča dajejo dodatno težo vključitvi okoljske problematike v teorijo planiranja materialnih potreb, ki je predmet pričujočega raziskovalnega dela. Razširitve modelov, ki jih obravnavamo v tretjem poglavju, dokazujejo, da je tovrstna integracija mogoča in da je z razširjeno teorijo planiranja materialnih potreb mogoče raziskovati ekonomsko-okoljsko ravnotežje za širok spekter izzivov, s katerimi se soočamo v sodobni družbi.

2 TEORIJA PLANIRANJA MATERIALNIH POTREB IN METODOLOGIJA DELA

2.1 RAZVOJ TEORIJE PLANIRANJA MATERIALNIH POTREB

Pojem proizvodnje postane še posebej aktualen s pojavom industrijske revolucije. Od takrat se skozi celotno obdobje pojavljajo različni poizkusi njenega znanstvenega raziskovanja in postavljanja teoretskih modelov, ki vključujejo tudi obravnavo zalog (Grubbström, 1995). Pri upravljanju zalog na nivoju enega končnega proizvoda, kjer njegova struktura ni pomembna, sta uveljavljena dva primarna pristopa:

- 1) statistična obravnavo zalog, pri kateri za določanje optimalnega nivoja zalog uporabljamo modele, ki temeljijo na statistični obravnavi,
- 2) točka ponovnega naročila, pri kateri skušamo z različnimi optimizacijskimi metodami poiskati tisti nivo zalog, pri katerem je treba izvesti ponovno naročilo.

Kadar opazujemo zaloge proizvodov, kjer je pomembna tudi njihova struktura, postane njihovo upravljanje veliko kompleksnejše. Takšni modeli so običajno večnivojski, lokacijsko razpršeni in neenakomerno časovno razporejeni. Imenujemo jih planiranje materialnih potreb.

Koncept planiranja materialnih potreb, ki je pred tem v praktični uporabi že dodobra uveljavljen, prvi podrobno opiše Orlicky (1975). Njegovo strokovno delo ovrže dotedanje prepričanje o nezmožnosti znanstvene obravnave tovrstnih sistemov in da zagon nadaljnjemu poglobljenemu znanstvenemu raziskovanju, za katerega se uveljavi ime teorija planiranja materialnih potreb.

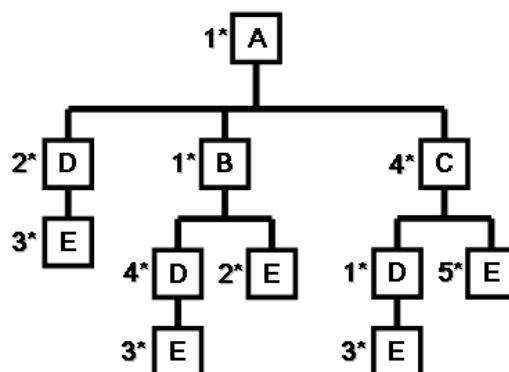
V okviru planiranja materialnih potreb ločimo dva osnovna sistema:

- 1) montažni sistem, pri katerem so elementi z nižjega nivoja sestavljeni (transformirani) v nove elemente na višjem nivoju (Slika 5),
- 2) razvežani sistem, pri katerem je element z nižjega nivoja uporabljen v več različnih elementih na višjem nivoju (Slika 6).

S pojmom mešani sistem poimenujemo takšen sistem, kjer pride do hkratnega prepletanja montažnega in razvežanega sistema.

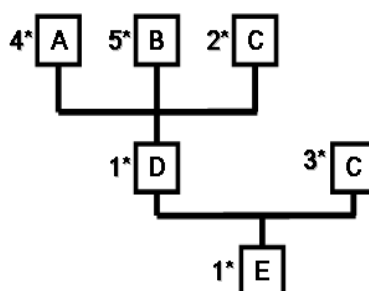
V praksi se montažni sistem uporablja zlasti pri modeliranju proizvodnih procesov, pri katerih je končni rezultat proizvod, ki je sestavljen v skladu s kosovnico (Slika 5). Razvežani sistemi (Slika 6) pa so običajno povezani z reciklažnimi in distribucijskimi aktivnostmi, pri katerih proizvod razstavimo na več komponent ali ga distribuiramo od njegove izvirne lokacije do različnih ciljnih lokacij, pri čemer potuje skozi distribucijske centre do veletrgovcev in nadalje trgovcev, kjer ga kupijo končni potrošniki (kar lahko interpretiramo kot najvišji nivo razvežanega sistema).

Slika 5: Primer kosovnice, kjer je končni proizvod A sestavljen iz komponent z več nivojev montažnega sistema



Vir: R.W. Grubbström, M. Bogataj in L. Bogataj, *A compact representation of distribution and reverse logistics in the value chain*, 2007, str. 16.

Slika 6: Primer obratne kosovnice znotraj razvejanega sistema, kjer proizvod E razstavimo na več komponent ali ga distribuiramo na različne lokacije



Vir: R.W. Grubbström, M. Bogataj in L. Bogataj, *A compact representation of distribution and reverse logistics in the value chain*, 2007, str. 16.

Pri proučevanju reciklaže v okviru sistema planiranja materialnih potreb je uveljavljen tudi pojem obratne kosovnice (angl. *Reverse Bill of Materials*). Obratna kosovnica reciklažnega podsistema (Fleischmann et al., 1997) vsebuje:

- 1) reciklirane količine komponent predhodnega elementa in
- 2) čas, ki je potreben za njihovo sprostitev.

Obratna kosovnica ne sovпада nujno s svojo osnovno kosovnico iz montažnega sistema. V tretjem poglavju doktorske disertacije prikazujemo, da koncept obratne kosovnice sovпада s predpostavko o različnih koeficientih reciklaže na različnih nivojih pojavljanja, saj se ti za posamične elemente sistema razlikujejo glede na njihovo izvirno celico aktivnosti.

Za sistem, ki vključuje tudi demontažne aktivnosti, je uveljavljeno poimenovanje obratno planiranje materialnih potreb (angl. *Reverse Material Requirements Planning* oziroma *RMRP*). Gupta in Taleb (1994) predpostavljata, da je postopek demontaže znotraj obratnega

planiranja materialnih potreb natanko inverzen postopku montaže, ta predpostavka pa v praksi ni vedno realna. Reciklažni podsistem teorije planiranja materialnih potreb lahko obravnavamo kot podsistem z enim vhodnim parametrom:

- 1) izrabljeni proizvodi

in dvema izhodnima parametroma:

- 1) reciklirane komponente,
- 2) odpadek.

Nadgradnja klasičnega sistema planiranja materialnih potreb z ostalimi informacijami, ki so potrebne za izvedbo proizvodnega procesa, pripelje do novega koncepta planiranja proizvodnih potreb (angl. *Manufacturing Resource Planning* oziroma *MRP2*). Za razliko od klasičnega sistema planiranja materialnih potreb, ki se primarno ukvarja z zalogami, ideja planiranja proizvodnih potreb implementira tudi druge vidike proizvodnega procesa, kot so finance, človeški viri in kontroling (Waldner, 1992). S povečanjem računalniških zmogljivosti se razvoj sistemov še dodatno pospeši in kot nadgradnja planiranja proizvodnih potreb se v praksi uveljavi generični koncept celovitih informacijskih rešitev (angl. *Enterprise Resource Planning* oziroma *ERP*), ki vpelje avtomatiko na nivoju celotne organizacije (Klaus, Rosemann & Gable, 2000). Gre za sodobne programske pakete, ki nudijo podporo vsem ključnim poslovnim odločitvam organizacije:

- 1) zaloge in proizvodnja (materialno poslovanje),
- 2) logistika in distribucija,
- 3) finance in računovodstvo,
- 4) trženje in prodaja,
- 5) kontrola kvalitete in
- 6) upravljanje s kadri (kadrovska evidenca).

Drevesno strukturo sestave proizvodov lahko namesto s kosovnico zapišemo s pomočjo grafov gozinto², ki jih v proizvodne modele prvič vpelje Vazsonyi (1954, 1955). Struktura grafov gozinto je podobna kosovnici, le da gre v primeru grafov gozinto za kompaktnejšo predstavitev, saj so identične relacije med nivoji kosovnice predstavljene samo enkrat.

Z vidika znanstvenega proučevanja so drevesne strukture relativno neuporabne, saj jih je težko neposredno vključiti v matematične modele. Z vidika integracije z matematičnimi modeli se kot veliko uporabnejši uveljavi zapis, ki temelji na input-output analizi, saj vsebuje strukture proizvodov zapisane v matrični obliki. Uporabnost te vrste zapisa povzemata Grubbström in Lundquist (1989): »Model input-output analize predstavlja način pretvorbe enega sklopa virov v drug sklop z uporabo učinkovitega matematičnega jezika.« Input-output analiza je posledično ključni temelj teorije planiranja materialnih potreb, zato je več podrobnosti o njeni uveljavitvi in njenem pomenu znotraj teorije planiranja materialnih potreb predstavljenih v samostojnem podpoglavju 2.2.

² Poimenovanje »gozinto« izhaja iz angleške besedne zveze »goes-into«.

Pri strukturni sestavi (pol)proizvodov moramo zaradi celostne obravnave modela upoštevati tudi časovne zakasnitve, do katerih prihaja znotraj posamičnih celic aktivnosti in med njimi, kadar imamo opravka s transportnimi aktivnostmi. Izvorna teorija planiranja materialnih potreb povezuje časovne zakasnitve zgolj z montažnimi postopki. V razširjeni teoriji planiranja materialnih potreb pa so lahko časovne zakasnitve tudi posledica distribucijskih, potrošnih ali demontažnih aktivnosti. Časovne zakasnitve vpeljemo v teorijo planiranja materialnih potreb s pomočjo Laplaceove transformacije. Laplaceova transformacija (Spiegel, 1965) je matematična metoda, ki jo v 18. stoletju razvije Pierre-Simon de Laplace in je v današnjem času nepogrešljiva predvsem v elektrotehniki. Uporablja se za reševanje diferencialnih enačb, znotraj teorije sistemov proučuje njihovo stabilnost, uveljavljena pa je tudi v verjetnostni teoriji.

Grubbström (1967) prvi ugotovi, da lahko časovne zakasnitve s pomočjo Laplaceove transformacije uspešno vpeljemo v obravnavo ekonomskih problemov. Gre za pionirsko delo s področja teorije planiranja materialnih potreb, ki daje osnovo za izračun neto sedanje vrednosti sistema, v katerem se za diskontiranje denarnih tokov uporablja zvezna obrestna mera. Vrednost elementa s kateregakoli nivoja kosovnice sestavimo s seštevanjem parcialnih dodanih vrednosti elementov z nižjih nivojev kosovnice, kar je v tovrstnih sistemih mogoče proučevati z uporabo Leontiefovega inverza. Pristop z neto sedanjo vrednostjo je pri obravnavi proizvodno-skladiščne problematike pravilnejši kot pristop s povprečnimi stroški. Proučujejo ga tudi v mnogih kasnejših delih (Grubbström, 1980; Grubbström, 1991; Grubbström & Lundquist, 1977; Grubbström & Jiang 1989; Thorstenson, 1988). Teorija planiranja materialnih potreb je v svoji osnovni obliki primerna tudi za proučevanje problemov realnega sveta; Grubbström (1990) jo tako uporabi na primeru planiranja proizvodnje v papirnici.

Grubbström in Ovrin (1992) sta prva, ki v model vpeljeta zaloge in časovne razporeditve proizvodnih aktivnosti, ki izhajajo iz časovnih zakasnitev, pri čemer uporabita z-transformacijo, ki je diskretni ekvivalent Laplaceove transformacije. Predstavita generalizirano vhodno matriko, ki poleg vhodnih zahtev vključuje tudi časovne zakasnitve.

Grubbström in Molinder (1994) in nadalje Molinder (1995) model nadgradita tako, da s pomočjo Laplaceove transformacije preideta iz diskretnega časa v zvezni čas. V njunih delih se prvič pojavijo temeljne enačbe teorije planiranja materialnih potreb, ki so osnova vsem nadaljnjim raziskavam s tega področja. Podrobneje jih predstavljamo v podpoglavju 2.3.

Simpozij v Storlienu leta 1997 (L. Bogataj, Grubbström & M. Bogataj, 1998) povzame dotedanja dela s področja razvoja teorije planiranja materialnih potreb in postavi temelje sodobnemu razvoju teorije, kot jo poznamo danes. Konferenca da zagon njenemu nadaljnjemu širšemu razvoju, ki se intenzivno nadaljuje v različne smeri znanstvenega proučevanja.

Segerstedt (1996) v planiranje materialnih potreb vpelje omejitve pri kapacitetah. Kapacitete postanejo del vhodne matrike, ki posledično ni več kvadratne oblike, ampak se njena dimenzija razširi na $n \times m$, pri čemer velja $n > m$ oziroma $n \times m = (m + n') \times m$ in je n' število celic aktivnosti z vnaprej določeno omejitvijo kapacitet. Segerstedtovo delo nadgradita Grubbström in Wang (2000), novejši prispevek s tega področja pa je delo Grubbströma in Huynha (2006).

Ker problemi realnega sveta v večini primerov niso deterministični, je naslednji velik izziv teorije prehod k stohastičnim procesom. To prvi raziskuje Grubbström (1996) in nivo zalog poveže s povpraševanjem, ki se pojavlja v neodvisnih časovnih intervalih stohastične narave. Povpraševanje se zadovoljuje s proizvodnimi procesi, njihov rezultat so različni obsegi (kontingenti) proizvodov, ki se pojavljajo v različnih, stohastično porazdeljenih časovnih trenutkih. Relativno visoka kompleksnost tovrstne problematike zahteva uporabo numeričnih primerov pri iskanju optimalnih rešitev. S stohastičnimi procesi se pod okriljem šole v Linköpingu s serijo člankov nadalje poglobljeno ukvarja Tang (Tang, 2000; Tang & Grubbström, 2002; Tang & Grubbström, 2003; Tang & Grubbström, 2005; Tang & Grubbström, 2006).

Da je mogoča celostna obravnava problematike zalog v stohastičnih sistemih, je razvidno tudi iz del, ki vključujejo varnostno zalogo (Grubbström, 1998; Grubbström, 1999; Grubbström & Tang, 1999). Raziskave vključujejo določanje velikosti kontingentov na nižjih nivojih kosovnice in njihov vpliv na obnašanje celotnega sistema planiranja materialnih potreb (Grubbström & Tang, 1998).

Svoj prispevek k razvoju teorije planiranja materialnih potreb dodajajo tudi slovenski raziskovalci, in sicer predvsem z vidika vključitve prostorske komponente (M. Bogataj & L. Bogataj, 2001; M. Bogataj & L. Bogataj, 2004) ter povezave s teorijo odločitev in iger (L. Bogataj & Horvat, 1996; Ferbar, 1998; Horvat & L. Bogataj, 1999). Nekoliko izven ustaljene teorije je raziskava o vzpostavitvi odločitvenega modela o pokojninskih shemah industrijskih delavcev (D. Bogataj, Vodopivec & M. Bogataj, 2012), ki širi zmožnosti teorije izven okvirov proizvodno-skladiščne problematike in proučevanja oskrbovalnih verig. Slovenski raziskovalci tudi med nastajanjem te doktorske disertacije aktivno prispevajo k širitvi teorije na celostne oskrbovalne verige.

Verjetno najpomembnejša smer, v katero se razvija teorija planiranja materialnih potreb v zadnjih letih, je razširitev njene klasične obravnave proizvodno-skladiščnih problemov na obravnavo celostne oskrbovalne verige, ki vključuje tudi povratno zanko preko reciklažnih podsistemov (M. Bogataj et al., 2011; Grubbström et al., 2007; Kovačič & L. Bogataj, 2011a). Ta prehod širi meje uporabnosti teorije z mikro ravni proti makro ravni. Teorija planiranja materialnih potreb tako postaja orodje za sprejemanje globalnih, strateških odločitev, hkrati pa še vedno dopušča mikroanalizo na nivoju posamične celice aktivnosti z najnižjega nivoja sistema. Vsebinsko zadnjih prispevkov, ki je tesno povezana tudi z okoljsko problematiko,

zaradi pomena za razumevanje doktorske disertacije podrobneje predstavljamo v samostojnem podpoglavju 2.4. Povzetek osnovnih enačb teorije planiranja materialnih potreb in njene bistvene formulacije, ki so potrebne za razumevanje osnov teorije, podrobneje predstavljamo v podpoglavju 2.3 te doktorske disertacije.

2.2 INPUT-OUTPUT ANALIZA

Input-output analiza je eden izmed bistvenih temeljev teorije planiranja materialnih potreb in posledično tudi obravnave problematike te doktorske disertacije. Prvi jo predstavi Nobelov nagrajenec Wasilly Leontief (1928). V svojih delih uporablja input-output analizo za proučevanje značilnosti trgovskih vezi med ZDA in ostalimi državami (Leontief, 1951; Leontief, 1966).

Izhodne tabele analizirajo procese, pri katerih vhodi neke industrije proizvajajo izhode, ki vstopajo v potrošnjo, lahko pa predstavljajo tudi vhode v drugo industrijo. Bruto proizvodnjo x v osnovnem modelu Leontiefove input-output analize izračunamo na naslednji način:

$$x = (I - A)^{-1} = Cy \quad (4)$$

Pri tem je pomen parametrov naslednji:

- 1) x : vektor bruto izhoda proizvodnje,
- 2) y : vektor povpraševanja po končnih produktih,
- 3) $A = (a_{ij})$: matrika vhodnih koeficientov,
- 4) $C = (c_{ij})$: matrika obratnih koeficientov in
- 5) $i, j = 1, \dots, n$: število proizvodnih sektorjev.

Leontief v svojih delih pripravi obsežne tabele koeficientov po različnih industrijah, ki jih uporabi v svojem modelu pri proučevanju makroekonomskih dejavnikov. V petdesetih letih 19. stoletja na Harvardu pri razvoju teorije tesno sodeluje z Walterjem Isardom in vpliva na njegovo uporabo input-output analize v študijah, vezanih na prostor (Isard, 1971). V Sloveniji o okoljski problematiki na podlagi Leontiefove in Isardove teorije pišeta M. Bogataj in Drobne (1990, 1993), v srednjeevropskem prostoru pa se obravnava okoljske problematike, vezana na input-output analizo, najprej pojavi v delih madžarske akademije znanosti v okviru slovensko-madžarskega projekta (M. Bogataj, Drobne & L. Bogataj, 1994).

Artenjak (1989) idejo Leontiefovega medsektorskega modeliranja z makroekonomskega vidika aplicira na modeliranje v proizvodnem poslovnem sistemu, v katerem komponente vektorjev input-output modela predstavljajo skladišča, normative porabe in količine proizvodnih učinkov sektorjev.

Izvorno Lentiefovo input-output analizo nadgrajuje večje število raziskovalcev, kar povzame Ciascini (1988) in združi različne prispevke več avtorjev na temo teoretične nadgradnje sistema, razvoja novih matrik koeficientov ter praktične aplikacije input-output analize.

Sodobnejši pregled različnih smeri razvoja input-output analize in načinov njene aplikacije najdemo pri Tenu Raaju (2005). V svojem pregledu kot pomembni smeri uporabe input-output analize podrobneje obravnava integracijo s proizvodnimi funkcijami in uporabo v modeliranju okoljske problematike, kar je v neposredni povezavi z raziskovalnim delom te doktorske disertacije. Input-output analiza v okoljskem smislu največkrat operira z dvema parametroma:

- 1) naravni viri, ki so vhodi v sistem,
- 2) onesnaževanje, ki je izhod iz sistema,

vendar so mogoče tudi drugačne aplikacije in interpretacije modelov.

Koopmans (1951), ki je leta 1975 nagrajen z Nobelovo nagrado za ekonomijo, vpelje pojem analize aktivnosti proizvodnje in alokacije (angl. *activity analysis*). Ta je za razliko od Leontiefove analize, ki se ukvarja z ravnovesjem medsektorskih tokov znotraj ekonomskega sistema, usmerjena v optimizacijske probleme proizvodnje. Koopmans je prvi, ki namesto kvadratnih uporabi pravokotne matrike. Vpelje tudi pojem tehnološke matrike $\mathbf{T}$, ki predstavlja razliko med izhodno matriko $\mathbf{G}$ in vhodno matriko $\mathbf{H}$, pri čemer predstavlja $\mathbf{G}$ izhode proizvodnje, $\mathbf{H}$ pa njene vhode. Povezavo med vhodi in izhodi sistema ter vsemi vmesnimi členi prestavi v pregledni obliki, ki omogoča relativno enostavno aplikacijo na probleme realnega sveta in interpretacijo rezultatov. Grubbströmov teorija planiranja materialnih potreb je močno inspirirana s strani Koopmansa in uporablja njene fundamentalne pristope za opisovanje proizvodnih problemov.

Vzporedno z razvojem input-output modela tudi Vazsonyi (1954, 1955, 1958) v okviru svojega znanstvenega programiranja (angl. *scientific programming*) povsem neodvisno predstavi svojo naslednjo montažno količinsko matriko (angl. *next assembly quantity matrix*). Matrika predstavlja matematični model za opis proizvodnje, ki pa je identičen input-output modelu.

Axsäter (1976) prepiše strukture proizvodov iz kosovnice v obliko vhodne matrike znotraj dinamičnega modela za opisovanje proizvodno-skladiščne dinamike. Gre za še eno od inspiracij Grubbströmove teorije planiranja materialnih potreb, kakršno poznamo danes (Grubbström & Lundquist, 1977).

Materialne strukture montažnih sistemov v teoriji planiranja materialnih potreb opišemo z vhodno matriko $\mathbf{H}$, pri čemer i -ta vrstica in i -ti stolpec predstavljata komponento k , ki leži znotraj kosovnice na istem nivoju ali na enem nivoju višje kot komponenta l , ki je v vrstici oziroma stolpcu $i + 1$ te matrike. Prva vrstica oziroma stolpec predstavlja končni proizvod na najvišjem nivoju kosovnice, ki ga v literaturi pogosto imenujemo kar ničelni nivo. Zadnje

vrstice pripadajo osnovnim surovinam, ki v sistem vstopijo z nabavnimi aktivnostmi. Komponenta k , ki se nahaja v i -tem stolpcu, je sestavljena iz n sestavnih elementov l z natanko enega nivoja kosovnice nižje, ki so v stolpcu i lahko zajeti po vrsticah od vključno $i + 1$. Primer strukture kosovnice s Slike 5 lahko z uporabo vhodne matrike $\mathbf{H}$ zapišemo v naslednji obliki:

$$\mathbf{H} = \begin{matrix} & \begin{matrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 4 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 5 & 3 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (5)$$

Materialne strukture razvejanih sistemov, ki izhajajo iz obratne kosovnice, opisujemo z izhodno matriko $\mathbf{G}$. Znotraj te matrike predstavljata i -ta vrstica in i -ti stolpec komponento k , ki se razstavi na elemente (ali distribuira na lokacije) l , ki so na višjem nivoju obratne kosovnice ($\leq i-1$). Zadnja vrstica oziroma stolpec tako predstavljata končni proizvod, ki se razstavi na komponente (ali distribuira na lokacije), ki ležijo na višjih nivojih kosovnice. Za primer s Slike 6 zapišemo izhodno matriko $\mathbf{G}$ v naslednji obliki:

$$\mathbf{G} = \begin{matrix} & \begin{matrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (6)$$

Neto proizvodnjo y takšnega sistema, ki z vidika proizvodnih procesov pomeni izdelke, ki zapustijo proizvodnjo, zapišemo kot:

$$y = (\mathbf{G} - \mathbf{H})x = \mathbf{T}x \quad (7)$$

Elementarni sistem je tisti sistem, pri katerem je rezultat proizvodnje en sam končni proizvod. V elementarnih sistemih predpostavimo, da je izhodna matrika $\mathbf{G}$ enaka enotski matriki $\mathbf{I}$ ($\mathbf{G} = \mathbf{I}$). Enačbo (7) lahko preoblikujemo tako, da dobimo:

$$x = (\mathbf{I} - \mathbf{H})^{-1} y = \mathbf{H}^* y \quad (8)$$

$\mathbf{H}^* = (\mathbf{I} - \mathbf{H})^{-1}$ imenujemo Leontiefov inverz.

Znotraj vektorja neto proizvodnje y se lahko pojavijo pozitivne količine (neto priliv v sistem) ali negativne količine (neto odliv iz sistema) končnih proizvodov, polizdelkov in surovin. Elementi, ki se znotraj sistema v celoti porabijo, imajo ničelno neto proizvodnjo. Negativno neto proizvodnjo lahko interpretiramo kot število elementov sistema, ki jih je treba zagotoviti ob začetku naslednjega cikla (izgubljeni elementi sistema).

2.3 OSNOVNE ENAČBE TEORIJE PLANIRANJA MATERIALNIH POTREB

Dolgoletni razvoj teorije planiranja materialnih potreb se odraža v precejšnjem obsegu znanstvenih raziskav in številu del s tega področja (podpoglavje 2.1). V tem podpoglavju navajamo osnovne enačbe, ki so potrebne za razumevanje teorije in jih v združeni obliki najdemo tudi v preglednih člankih na temo teorije planiranja materialnih potreb (Grubbström, 2007; Grubbström et al., 2007; Grubbström & Tang, 2000).

V model input-output matrik poleg struktur vključujemo tudi časovne zakasnitve, in sicer s pomočjo Laplaceove transformacije v frekvenčnem območju (Spiegel, 1965). Laplaceova transformacija časovne funkcije $f(t)$, ki obstaja v nenegativnem času ($t \geq 0$), je definirana kot:

$$\tilde{f}(s) = \mathcal{L}\{f(t)\} = \int_{t=0}^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (9)$$

Njena inverzna transformacija funkcijo transformira iz frekvenčnega območja nazaj v časovno območje in jo običajno zapišemo kot:

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}\{\tilde{f}(s)\} \quad (10)$$

V zgornjih formulacijah predstavlja s kompleksno frekvenco:

$$s = \sigma + \omega\sqrt{-1} \quad (11)$$

Izmed vseh teoremov Laplaceove transformacije se znotraj teorije planiranja materialnih potreb kot ključni pojavljajo:

1) Teorem integracije časa:

$$\mathcal{L}\left\{\int_0^t f(\beta) d\beta\right\} = \mathcal{L}\{f(t)\} / s \quad (12)$$

2) Teorem povprečnega časa (teorem mejne vrednosti):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t x(\tau) d\tau = \lim_{s \rightarrow 0} s\tilde{x}(s) \quad (13)$$

3) Teorem prevedbe časa:

$$\mathcal{L}\{f(t-\tau)\} = \mathcal{L}\{f(t)\}e^{-s\tau} = \tilde{f}(s)e^{-s\tau} \quad (14)$$

Pri tem predstavlja τ konstanten interval, ki pri razvejanih sistemih časovno funkcijo enolično prevaja naprej skozi čas. V montažnih sistemih je funkcija enolično prevajana nazaj skozi čas, njena pripadajoča transformacija pa je:

$$\mathcal{L}\{f(t+\tau)\} = \mathcal{L}\{f(t)\}e^{s\tau} = \tilde{f}(s)e^{s\tau} \quad (15)$$

V tem primeru predpostavimo, da je $f(t) = 0$, kadar velja $t < \tau$, sicer bo šla časovna funkcija $f(t)$ skozi časovno točko $t = 0$, kar pa je v nasprotju z definicijo transformacije.

4) Teorem neto sedanje vrednosti:

$$\text{NSV} = \int_0^{\infty} a(t)e^{-\rho t} dt = \tilde{a}(\rho) \quad (16)$$

Pri tem predstavlja NSV neto sedanje vrednost denarnega toka $a(t)$, kompleksno frekvenco s pa nadomestimo z zvezno obrestno mero ρ . Obrestna mera je sicer v realnosti diskretna, pojem zvezna obrestna mera uporabljamo zaradi zveznosti integracije na intervalu od nič do neskončnosti.

S pomočjo input-output analize v modelu zajemamo strukturo kosovnice, Laplaceovo transformacijo pa uporabimo za transformacijo časovne funkcije v frekvenčno domeno. τ_j predstavlja čas, v katerem mora biti pred časom začetka proizvodnje t na razpolago $h_{ij}P_j(t)$ elementov i , $P_j(t)$ pa obseg elementov j , ki se proizvedejo v časovnem trenutku t . Matriko časovnih zakasnitev zapišemo v naslednji obliki:

$$\tilde{\tau}(s) = \begin{bmatrix} e^{s\tau_1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & e^{s\tau_m} \end{bmatrix} \quad (17)$$

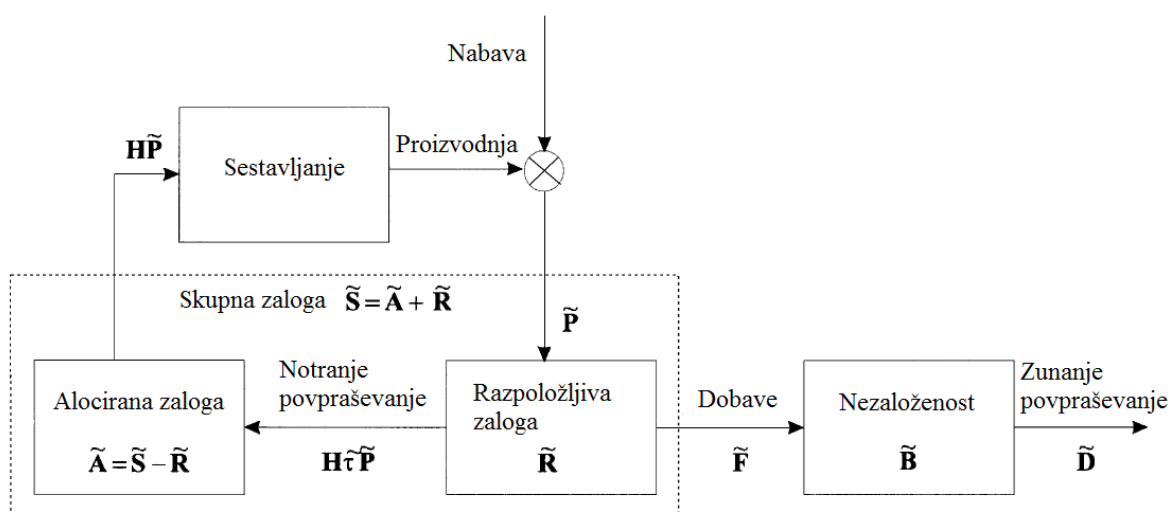
Generalizirano vhodno matriko $\tilde{\mathbf{H}}(s)$, ki sestoji tako iz materialnih struktur (obsega zahtev) kot tudi časovnih zakasnitev (časovni razpored obsega teh zahtev), zapišemo kot:

$$\tilde{\mathbf{H}}(s) = \mathbf{H}\tilde{\tau}(s) \quad (18)$$

Generalizirana vhodna matrika v zgoščeni obliki opisuje vse obsege komponent, ki morajo biti na razpolago v točno določenem časovnem trenutku, da bo proizvodni plan $\tilde{\mathbf{P}}(s)$ izvedljiv, kar je eden od bistvenih dosežkov teorije planiranja materialnih potreb.

Na Sliki 7 prikazujemo dinamiko celotne, razpoložljive in alocirane zaloge ter nezaloženosti. Model s Slike 7 v matematični formulaciji opisujemo s sistemom osnovnih enačb teorije planiranja materialnih potreb.

Slika 7: Proces materialnih tokov v teoriji planiranja materialnih potreb, ki je osnova temeljnih enačb teorije



Vir: R.W. Grubbström, *A net present value approach to safety stocks in a multi-level MRP system*, 1999, str. 362.

Pomen parametrov s Slike 7 je naslednji:

- 1) $\tilde{\mathbf{F}}(s)/s$: kumulativne dobave, ki so odvisne od zunanjega povpraševanja,
- 2) $\tilde{\mathbf{P}}(s)/s$: kumulativna proizvodnja,
- 3) $\tilde{\mathbf{D}}(s)/s$: kumulativno zunanje povpraševanje,
- 4) $\mathbf{S}(0)$: vektor začetne zaloge,
- 5) $\mathbf{R}(0)$: vektor začetne razpoložljive zaloge,
- 6) $\mathbf{A}(0) = \mathbf{S}(0) - \mathbf{R}(0)$: vektor začetne alocirane zaloge, ki je razlika med začetno in razpoložljivo zalogo,

- 7) $\tilde{\mathbf{B}}(s)/s$: vektor nezaloženosti,
- 8) $\mathbf{H}\tilde{\mathbf{P}}(s)/s$: kumulativno notranje povpraševanje in
- 9) $\mathbf{H}\tilde{\mathbf{r}}\tilde{\mathbf{P}}(s)/s$: kumulativno notranje povpraševanje v trenutku, ko so komponente rezervirane.

Skupna zaloga $\tilde{\mathbf{S}}(s)$ znotraj proizvodnega procesa so vsi elementi, ki se nahajajo v sistemu:

$$\tilde{\mathbf{S}}(s) = \frac{\mathbf{S}(0) + (\mathbf{I} - \mathbf{H}\tilde{\mathbf{r}}(s))\tilde{\mathbf{P}}(s) - \tilde{\mathbf{F}}(s)}{s} \quad (19)$$

Pri tem deljenje $1/s$ predstavlja časovno integracijo v skladu z enačbo (12).

Razpoložljiva zaloga $\tilde{\mathbf{R}}(s)$ so vsi trenutno razpoložljivi elementi sistema:

$$\tilde{\mathbf{R}}(s) = \frac{\mathbf{R}(0) + (\mathbf{I} - \mathbf{H}\tilde{\mathbf{r}}(s))\tilde{\mathbf{P}}(s) - \tilde{\mathbf{F}}(s)}{s} \quad (20)$$

Če želimo, da bo plan $\tilde{\mathbf{P}}(s)$ izvedljiv, mora vedno veljati $\mathbf{E}^{-1}\{\tilde{\mathbf{R}}(s)\} \geq \mathbf{0}$. Pogoji imenujemo omejitve razpoložljive zaloge.

Alocirana zaloga je razlika med skupno in razpoložljivo zalogo, ki je rezervirana za proizvodnjo:

$$\tilde{\mathbf{A}}(s) = \tilde{\mathbf{S}}(s) - \tilde{\mathbf{R}}(s) = \frac{\mathbf{A}(0) + \mathbf{H}(\tilde{\mathbf{r}}(s) - \mathbf{I})\tilde{\mathbf{P}}(s)}{s} \quad (21)$$

Notranjemu povpraševanju mora biti vedno v celoti zadoščeno, pri zunanjem povpraševanju pa model dopušča stanje nezaloženosti. Stanje nezaloženosti izničimo z naslednjim proizvodnim ciklom, lahko pa ga obravnavamo tudi kot izgubljeno prodajo. Stanje nezaloženosti $\tilde{\mathbf{B}}(s)$ je v celoti odvisno od zunanjega povpraševanja in ga v primeru, ko ne dopuščamo izgubljenih prodaj, zapišemo kot:

$$\tilde{\mathbf{B}}(s) = \frac{\mathbf{B}(0) + \tilde{\mathbf{D}}(s) - \tilde{\mathbf{F}}(s)}{s} \quad (22)$$

Nezaloženost $\tilde{\mathbf{B}}(s)$ je po definiciji nenegativna. Če od enačbe (20) odštejemo nezaloženost enačbe (22), s tem odstranimo $\tilde{\mathbf{F}}(s)$ in razpoložljiva zaloga $\tilde{\mathbf{R}}(s)$ postane:

$$\tilde{\mathbf{R}}(s) = \frac{\mathbf{R}(0) - \mathbf{B}(0) + (\mathbf{I} - \mathbf{H}\tilde{\mathbf{r}}(s))\tilde{\mathbf{P}}(s) - \tilde{\mathbf{D}}(s)}{s} + \tilde{\mathbf{B}}(s) \quad (23)$$

Končna zaloga proizvoda in njegova nezaloženost ne moreta biti hkrati pozitivni, saj se razpoložljiva zaloga znižuje istočasno s pojavom zunanjega povpraševanja. Če torej za katerokoli komponento i v času t velja:

- 1) $r_i(t) > 0$, bo hkrati veljalo tudi $b_i(t) = 0$,
- 2) $b_i(t) > 0$, bo hkrati veljalo tudi $r_i(t) = 0$.

Transformaciji $r_i(t)$ in $b_i(t)$ sta posledično:

$$\tilde{\mathbf{R}}(s) = \left[\frac{\mathbf{R}(0) - \mathbf{B}(0) + (\mathbf{I} - \mathbf{H}\tilde{\tau}(s))\tilde{\mathbf{P}}(s) - \tilde{\mathbf{D}}(s)}{s} \right]_+ \quad (24)$$

$$\tilde{\mathbf{B}}(s) = \left[\frac{\mathbf{B}(0) - \mathbf{R}(0) + (\mathbf{I} - \mathbf{H}\tilde{\tau}(s))\tilde{\mathbf{P}}(s) - \tilde{\mathbf{D}}(s)}{s} \right]_+ \quad (25)$$

Skupno zalogo $\tilde{\mathbf{S}}(s)$ lahko zapišemo kot vsoto razpoložljive in alocirane zaloge:

$$\tilde{\mathbf{S}}(s) = \left[\frac{\mathbf{R}(0) - \mathbf{B}(0) + (\mathbf{I} - \mathbf{H}\tilde{\tau}(s))\tilde{\mathbf{P}}(s) - \tilde{\mathbf{D}}(s)}{s} \right]_+ + \frac{\mathbf{A}(0) + \mathbf{H}(\tilde{\tau}(s) - \mathbf{I})\tilde{\mathbf{P}}(s)}{s} \quad (26)$$

V literaturi se zgornje enačbe, ki opisujejo razvoj $\tilde{\mathbf{R}}(s)$, $\tilde{\mathbf{S}}(s)$, $\tilde{\mathbf{A}}(s)$ in $\tilde{\mathbf{B}}(s)$, imenujejo temeljne enačbe teorije planiranja materialnih potreb in so osnova vsem raziskavam, ki temeljijo na tej teoriji.

Zgoraj opisani montažni sistem razširimo še z razvejanim sistemom in ga obravnavamo kot mešani sistem, kar je bistvenega pomena pri obravnavi celostnih oskrbovalnih verig znotraj razširjene teorije planiranja materialnih potreb. Zato moramo enotsko matriko $\mathbf{I}$ zamenjati z izhodno matriko $\mathbf{G}$ oziroma t. i. generalizirano izhodno matriko $\tilde{\mathbf{G}}(s)$. V takšnih modelih lahko $\tilde{\mathbf{F}}(s)$ interpretiramo kot izhode iz zaprtega cikličnega sistema, ki so običajno posledica nerekiciliranih elementov reciklažnega podsistema, ki končajo kot odpadki na deponiji. Z vidika energetske obravnave interpretiramo $\tilde{\mathbf{F}}(s)$ kot anergijo, torej neuporabljen del energije znotraj sistema. Z okoljskega vidika so dobave $\tilde{\mathbf{F}}(s)$ tudi izpusti v naravno okolje (npr. onesnaženje v obliki odpadnih voda, izpusta trdih delcev v ozračje, industrijskih odpadkov, radioaktivnega sevanja ipd.). Skupno zalogo $\tilde{\mathbf{S}}(s)$ znotraj takšnega razširjenega mešanega sistema zapišemo v naslednji obliki:

$$\tilde{\mathbf{S}}(s) = \frac{\mathbf{S}(0) + (\tilde{\mathbf{A}}(s)\mathbf{G} - \mathbf{H}\tilde{\tau}(s))\tilde{\mathbf{P}}(s) - \tilde{\mathbf{F}}(s)}{s} \quad (27)$$

Razpoložljiva zaloga $\tilde{\mathbf{R}}(s)$ je v takem primeru:

$$\tilde{\mathbf{R}}(s) = \frac{\mathbf{R}(0) + (\tilde{\Lambda}(s)\mathbf{G} - \mathbf{H}\tilde{\tau}(s))\tilde{\mathbf{P}}(s) - \tilde{\mathbf{F}}(s)}{s} \quad (28)$$

V razvejanem sistemu se elementi pojavijo z določenim časovnim zamikom glede na čas inicializacije posamične aktivnosti. Gostota izhodnega toka elementov je podana z $\mathbf{GP}$. Če bi se vektor gostote tokov $\mathbf{P}$ pri razvejanih sistemih enako kot pri montažnih sistemih nanašal na čas, ko so elementi iz procesov razpoložljivi (dokončani), bi čas vhoda različnih elementov v večini primerov variiral, torej njihov vhod ne bi bil sočasen. Takšna predpostavka ni realna, zato se v razvejanem sistemu $\mathbf{P}$ nanaša na začetni čas, ki je čas začetka aktivnosti (npr. demontaže na prvem nivoju obratne kosovnice). Izhodna količina elementov k iz procesa j na nivoju $P_j(t)$ je $g_{kj}P_j(t)$. Če se $P_j(t)$ nanaša na začetek procesa (začetni čas) in je Δ_k potreben čas izločitve, bodo izločeni elementi na voljo v času $t + \Delta_k$. To pomeni, da je zaradi izvajanja procesa j na nivoju $P_j(t)$ v času t izhodna količina elementov enaka $e^{-s\Delta_k}g_{kj}P_j(s)$. Posplošeno imajo procesi v razvejanih sistemih, katerih vhodi se pojavijo v času t in imajo transformiran vektor aktivnosti $\tilde{\mathbf{P}}(s)$, obseg in časovno razporeditev izhodov določena z:

$$\begin{bmatrix} e^{-s\Delta_1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & e^{-s\Delta_n} \end{bmatrix} \mathbf{G}\tilde{\mathbf{P}}(s) = \tilde{\Lambda}(s)\mathbf{G}\tilde{\mathbf{P}}(s) = \tilde{\mathbf{G}}(s)\tilde{\mathbf{P}}(s) \quad (29)$$

Diagonalna matrika $\tilde{\Lambda}(s)$ predstavlja matriko časovnih zakasnitev izhodov, $\tilde{\mathbf{G}}(s) = \tilde{\Lambda}(s)\mathbf{G}$ pa generalizirano izhodno matriko.

Neto proizvodnja mešanega sistema $(\tilde{\mathbf{G}}(s) - \tilde{\mathbf{H}}(s))\tilde{\mathbf{P}}(s)$, ki vsebuje montažne in razvejane procese z več vhodi in izhodi, je:

$$\begin{aligned} (\tilde{\mathbf{G}}(s) - \tilde{\mathbf{H}}(s))\tilde{\mathbf{P}}(s) &= (\tilde{\Lambda}(s)\mathbf{G} - \mathbf{H}\tilde{\tau}(s))\tilde{\mathbf{P}}(s) = \\ &= \left(\begin{bmatrix} e^{-s\Delta_1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & e^{-s\Delta_n} \end{bmatrix} \mathbf{G} - \mathbf{H} \begin{bmatrix} e^{s\tau_1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & e^{s\tau_m} \end{bmatrix} \right) \tilde{\mathbf{P}}(s) \end{aligned} \quad (30)$$

V splošni literaturi razliko $\mathbf{G} - \mathbf{H}$ imenujemo tehnološka matrika, zato skladno z uveljavljeno nomenklaturo $\tilde{\mathbf{G}}(s) - \tilde{\mathbf{H}}(s)$ poimenujemo generalizirana tehnološka matrika. Če je količina komponente vektorja neto proizvodnje negativna, moramo to količino vzeti iz razpoložljive

zaloge ali pa jo uvoziti v sistem. Če je količina te komponente pozitivna, pa jo v tem obsegu dobavimo v okolico sistema ali dodamo razpoložljivi zalogi.

Pri časovnih funkcijah, ki se ponavljajo periodično in imajo dolžino periode T , zapišemo njihove transformacije v naslednji obliki:

$$\mathcal{L}\left\{\sum_{k=0}^{\infty} f(t-kT)\right\} = \frac{\tilde{f}(s)}{1-e^{-sT}} \quad (31)$$

Za modeliranje cikličnih ponavljajočih se procesov v enakomernih časovnih intervalih T_j , pri čemer je $j = 1, 2, \dots, m$, lahko z uvedbo diagonalnih matrik $\tilde{\mathbf{t}}(s)$ in $\tilde{\mathbf{T}}(s)$ zapišemo plan $\tilde{\mathbf{P}}(s)$ na naslednji način:

$$\tilde{\mathbf{P}}(s) = \tilde{\mathbf{t}}(s)\tilde{\mathbf{T}}(s)\hat{\mathbf{P}} \quad (32)$$

Pri tem $\tilde{\mathbf{t}}(s)$ in $\tilde{\mathbf{T}}(s)$ definiramo kot:

$$\tilde{\mathbf{t}}(s) = \begin{bmatrix} e^{-st_1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & e^{-st_m} \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$\tilde{\mathbf{T}}(s) = \begin{bmatrix} (1-e^{-sT_1})^{-1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & (1-e^{-sT_m})^{-1} \end{bmatrix} \quad (34)$$

S konstantami vektorja $\hat{\mathbf{P}}$ lahko opisujemo gostote tokov celotne proizvodnje ali distribucije za vsak proces znotraj periode T_j , pri čemer so t_j točke v času, ko se prične vsak izmed pripadajočih ciklov, in pri čemer je $j = 1, 2, \dots, m$.

Pomembna prednost teorije planiranja materialnih potreb je njena zmožnost obravnave problematike z ekonomske perspektive. Ekonomske vrednosti elementov na posamičnem nivoju lahko strnemo v vrstični cenovni vektor $\mathbf{p}$:

$$\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_n] \quad (35)$$

Vhodi v sistem, ki so običajno povezani z nabavnimi aktivnostmi, povzročijo odliv finančnih sredstev, ki predstavljajo plačilo za kupljene vhodne elemente sistema. Po ekvivalentni logiki izhodi iz sistema običajno generirajo prilive finančnih sredstev, ki predstavljajo plačilo za

končne izdelke. V določenih situacijah povzročijo odlive finančnih sredstev tudi izhodi iz sistema. Do takšnih situacij prihaja, ko proučujemo okoljsko problematiko, kjer so izhodi sistema odpadki ali onesnaževanje okolja, za katero smo dolžni plačevati pripadajoče dajatve. Ob predpostavki, da so vsa plačila finančne narave in da je transformiran tok med dvema podsistemoma:

$$\tilde{\mathbf{x}}'(s) = \begin{bmatrix} \tilde{x}'_1(s) \\ \tilde{x}'_2(s) \\ \vdots \\ \tilde{x}'_n(s) \end{bmatrix} \quad (36)$$

bo pripadajoči denarni tok:

$$\mathbf{p}\tilde{\mathbf{x}}'(s) = \sum_{i=1}^n p_i \tilde{x}'_i(s) \quad (37)$$

Pri tem se pozitivni členi nanašajo na prejete prilive finančnih sredstev in negativni členi na njihove odlive. V skladu s teoremom o neto sedanji vrednosti (enačba 16) zapišemo neto sedanjo vrednost denarnega toka kot:

$$\text{NSV}' = \mathbf{p}\tilde{\mathbf{x}}'(\rho) = \sum_{i=1}^n p_i \tilde{x}'_i(\rho) \quad (38)$$

Pri tem je ρ zvezna obrestna mera.

V zveznem času nastopajo tudi diskretni dogodki, kot je na primer izvedba posamičnega naročila (inicializacija oziroma vzpostavitev cikla). Za ustrezno obravnavo takšnih primerov moramo uvesti Diracovo delta funkcijo (oziroma impulzno funkcijo): $\delta(t-t')$, ki obstaja, kadar velja $t=t'$ in je t' točka v času ob pogoju $t' \geq 0$. Diracovo impulzno funkcijo definiramo kot neskončno ozek in neskončno visok impulz z enotskim prostorom. Njeno Laplaceovo transformacijo zapišemo kot:

$$\mathbb{E} \{ \delta(t-t') \} = e^{-st'} \quad (39)$$

Kadar se procesi izvajajo z diskretnimi kontingenti v času t'_{jk} , pri čemer je $k = 1, 2, \dots, n$ za vsak posamični proces j , lahko za te čase določimo vzpostavitevne stroške, ki so fiksni. Takšne čase uvedbe za procese j zberemo v sekvenco Diracovih impulzov $\delta(t-t'_{jk})$, transformacijo takšnih sekvenc pa podamo z:

$$\tilde{v}_j(s) = \sum_k \mathbb{E} \{ \delta(t - t'_{jk}) \} = \sum_k e^{-st'_{jk}} \quad (40)$$

Kadar se pri vsakem takšnem kontingentu pojavlja fiksni odliv finančnih sredstev K_k , je kumulativna neto sedanja vrednost plačil:

$$K_j \tilde{v}_j(\rho) = K_j \sum_k e^{-\rho t'_{jk}} \quad (41)$$

Kadar se procesi na kontingentih izvajajo v neskončnem številu zaporednih sekvenc, pri čemer je dolžina posamičnega časovnega intervala T_j konstantna, zapišemo neto sedanjo vrednost vzpostavitvenih stroškov kot:

$$\text{NSV} = \frac{K_j e^{-\rho t_j}}{1 - e^{-\rho T_j}} \quad (42)$$

Pri tem se obdelava prvega kontingenta pojavi v času $t'_{j1} = t_j$. V splošni obravnavi zberemo vzpostavitvene stroške v vrstičnem stroškovnem vektorju na podoben način kot v cenovnem vektorju:

$$\hat{\mathbf{K}} = [K_1, K_2, \dots, K_m] \quad (43)$$

Ob predpostavki, da vsi procesi potekajo v diskretnih kontingentih in da:

$$\tilde{\mathbf{v}}(s) = \begin{bmatrix} \tilde{v}_1(s) \\ \vdots \\ \tilde{v}_m(s) \end{bmatrix} \quad (44)$$

predstavlja m -dimenzionalni vektor vseh vzpostavitev, je kumulativna neto sedanja vrednost vzpostavitvenih stroškov:

$$\text{NSV}_{\text{vzpostavitev}} = -\hat{\mathbf{K}}\tilde{\mathbf{v}}(\rho) = -\hat{\mathbf{K}} \begin{bmatrix} \tilde{v}_1(\rho) \\ \vdots \\ \tilde{v}_m(\rho) \end{bmatrix} = -\sum_{j=1}^m K_j \tilde{v}_j(\rho) \quad (45)$$

Za razliko od diskretnih procesov je v primeru cikličnih procesov kumulativna neto sedanja vrednost:

$$\text{NSV}_{\text{vzpostavitev}} = -\hat{\mathbf{K}}\tilde{\mathbf{v}}(\rho) = -\sum_{j=1}^m \frac{K_j e^{-\rho t_j}}{1 - e^{-\rho T_j}} = -\hat{\mathbf{K}}\tilde{\mathbf{t}}(\rho)\tilde{\mathbf{T}}(\rho)\mathbf{1} \quad (46)$$

Pri tem je $\mathbf{1}$ m -dimenzionalni stolpčni enotski vektor.

Kadar vsi tokovi elementov v sistemu opisujejo relevanten denarni tok, zapišemo kumulativno neto sedanjo vrednost celotnega sistema kot:

$$NSV = \mathbf{p}(\tilde{\Delta}(\rho)\mathbf{G} - \mathbf{H}\tilde{\tau}(\rho))\tilde{\mathbf{P}}(s) - \hat{\mathbf{K}}\tilde{\mathbf{v}}(\rho)\mathbf{1} \quad (47)$$

2.4 DOSEDANJA VKLJUČITEV OKOLJSKEGA VIDIKA V TEORIJU PLANIRANJA MATERIALNIH POTREB

Okoljski vidik v teorijo planiranja materialnih potreb vpeljejo Grubbström et al. (2007) ter L. Bogataj in M. Bogataj (2008). Logistiko predelave ostankov razumejo kot razširitev odgovornosti proizvajalca znotraj oskrbovalne verige, ki se odraža v obliki ekoloških dajatev. Odgovornost proizvajalca torej podaljšujejo v faze, ki sledijo potrošnji končnega proizvoda. Proizvajalci in drugi členi oskrbovalne verige se namreč ne smejo osredotočati zgolj na končne proizvode in njihove funkcionalnosti, temveč morajo v trenutku, ko se življenjska doba njihovih izdelkov izteče, prevzeti odgovornost zanje. Avtorji torej odgovornost za ustrezno reciklažo in deponiranje oziroma uničenje ostankov v primeru potrošnih dobrin z lokalnih oblasti prenašajo na privatne celice aktivnosti v oskrbovalni verigi, kar posledično pomeni, da se stroški ravnanja z odpadki vključijo v končno ceno proizvoda. Končni porabniki tako stroškov ravnanja z odpadki ne plačujejo v obliki lokalnih dajatev, saj so stroški reciklaže že vključeni v končno ceno proizvoda.

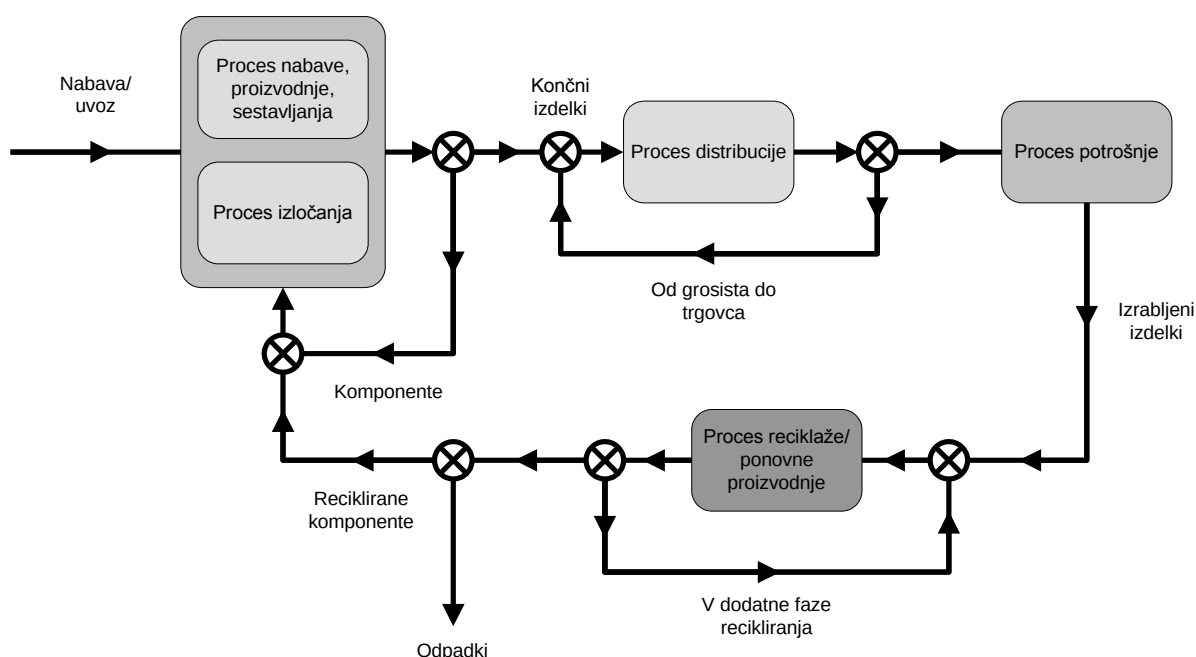
Grubbström et al. (2007) zgoraj opisani način prenosa odgovornosti vključijo v negativni cenovni parameter p_7 , ki v model vpeljuje ekološke stroške. Ti stroški so rezultat s strani lokalnih oblasti predpisanih dajatev in so sestavni del končne cene proizvoda. Model temelji na predpostavki, da končni potrošniki izrabljene izdelke v celoti vrnejo nazaj v oskrbovalno verigo, kjer jih do neke mere recikliramo, nereciklirani izdelki pa zaključijo svoj cikel na deponiji. Odpadni tok je odvisen od stopnje reciklaže α , ta pa je odvisna od količine potrebnega dela L in kvalitete odpadnega proizvoda ob koncu njegovega življenjskega cikla.

Za doseganje višjih stopenj reciklaže α potrebujemo več vhodne količine dela L za izvedbo reciklažnih aktivnosti, kar predstavlja strošek v višini $c_L L$. Strošek delovne sile $c_L L$ lahko vključimo v končno ceno proizvoda neposredno ali pa preko lokalnih okoljskih dajatev. Logistika predelave ostankov torej skrbi za ponovno uporabo recikliranih elementov in posledično znižuje količino odpadnega materiala. Avtorji izračunavajo optimalno ravnotežje s pomočjo neto sedanje vrednosti, ki jo obravnavajo izolirano od celotnega cikličnega sistema, torej parcialno na nivoju posamičnega končnega proizvoda, ki ga recikliramo.

Proizvajalci so prisiljeni izdelovati bolj ekološke proizvode, ki ob koncu svojega življenjskega cikla ustvarijo manj odpadnega materiala, saj morajo sami prevzeti strošek

reciklaže oziroma deponiranja nerekiclranih izdelkov. Tak pristop predstavlja vezni člen med oblikovanjem proizvoda in ponovno uporabo, saj želimo doseči čim višjo učinkovitost reciklaže in hkrati njeno ekonomičnost. Prej omenjeni izvorni deli (Grubbström et al., 2007; L. Bogataj & M. Bogataj, 2008), ki prvič vpeljujeta pojem okoljskega ravnotežja v teorijo planiranja materialnih potreb, torej proučujeta premik k bolj ekološkemu oblikovanju izdelkov ter razvoju sistemov logistike predelave odpadkov in njihove ponovne uporabe. Te strategije vključujemo v sisteme oskrbovalnih verig kot odgovore na nove okoljske vzpodbude in direktive, ki jih predstavljamo v prvem poglavju te disertacije. Razširjeni model oskrbovalne verige pa prikazujemo na Sliki 8.

Slika 8: Integrirani sistem, ki vključuje tudi reciklažo in ponovno uporabo



Vir: R.W. Grubbström, M. Bogataj in L. Bogataj, *A compact representation of distribution and reverse logistics in the value chain*, 2007, str. 25.

Model celostne oskrbovalne verige je sestavljen iz štirih podsistemov, zato avtorji vse procese znotraj takšne verige razvrščajo v štiri skupine oziroma podsisteme. Prvi podsistem predstavlja proizvodnjo, drugi distribucijo, tretji potrošnjo in četrti reciklažo. Vhodni elementi so posledično razvrščeni glede na podsistem, v katerem se pojavijo kot vhod. Vektor gostote tokov $\mathbf{P}$ tako zajema vsak posamični podsistem, in sicer:

- 1) $\mathbf{P}_1$ predstavlja gostoto tokov elementov, ki se nanašajo na proizvodni podsistem,
- 2) $\mathbf{P}_2$ predstavlja gostoto tokov elementov, ki se nanašajo na distribucijski podsistem,
- 3) $\mathbf{P}_3$ predstavlja gostoto tokov elementov, ki se nanašajo na potrošni podsistem in
- 4) $\mathbf{P}_4$ predstavlja gostoto tokov elementov, ki se nanašajo na distribucijski podsistem.

Nadalje predstavlja $\mathbf{x}_k$ vhodne zahteve posamičnega podsistema k ($k = 1, 2, 3, 4$), pri čemer predstavlja:

- 1) $\mathbf{x}_1$ vhodne zahteve po elementih, ki jih potrebujemo za izvedbo proizvodnih aktivnosti,
- 2) $\mathbf{x}_2$ vhodne zahteve po elementih, ki jih potrebujemo za izvedbo distribucijskih aktivnosti,
- 3) $\mathbf{x}_3$ vhodne zahteve po elementih, ki jih potrebujemo za izvedbo potrošnih aktivnosti, in
- 4) $\mathbf{x}_4$ vhodne zahteve po elementih, ki jih potrebujemo za izvedbo reciklažnih aktivnosti.

Vhodne zahteve celotnega sistema ($\mathbf{x}$) v splošni obliki zapišemo v naslednji obliki:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \\ \mathbf{x}_3 \\ \mathbf{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{11} & \mathbf{H}_{12} & \mathbf{H}_{13} & \mathbf{H}_{14} \\ \mathbf{H}_{21} & \mathbf{H}_{22} & \mathbf{H}_{23} & \mathbf{H}_{24} \\ \mathbf{H}_{31} & \mathbf{H}_{32} & \mathbf{H}_{33} & \mathbf{H}_{34} \\ \mathbf{H}_{41} & \mathbf{H}_{42} & \mathbf{H}_{43} & \mathbf{H}_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 \\ \mathbf{P}_2 \\ \mathbf{P}_3 \\ \mathbf{P}_4 \end{bmatrix} = \mathbf{H}\mathbf{P} \quad (48)$$

$\mathbf{H}_{ij}$ predstavlja posamično vhodno podmatriko, ki se nanaša na potrebe po komponentah, ki jih zahteva podsistem i pri izvajanju procesa v podsistemu j . Večina podmatrik $\mathbf{H}_{ij}$ je ničelnih, zato vhodno matriko $\mathbf{H}$ zapišemo v naslednji splošni obliki:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{11} & \mathbf{H}_{12} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{H}_{22} & \mathbf{H}_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (49)$$

Ker mora vhodna matrika $\mathbf{H}$ po dimenziji sovpadati z izhodno matriko $\mathbf{G}$, tudi izhode iz sistema ($\mathbf{y}$) obravnavamo kot rezultat aktivnosti štirih podsistemov:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \\ \mathbf{y}_3 \\ \mathbf{y}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{11} & \mathbf{G}_{12} & \mathbf{G}_{13} & \mathbf{G}_{14} \\ \mathbf{G}_{21} & \mathbf{G}_{22} & \mathbf{G}_{23} & \mathbf{G}_{24} \\ \mathbf{G}_{31} & \mathbf{G}_{32} & \mathbf{G}_{33} & \mathbf{G}_{34} \\ \mathbf{G}_{41} & \mathbf{G}_{42} & \mathbf{G}_{43} & \mathbf{G}_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 \\ \mathbf{P}_2 \\ \mathbf{P}_3 \\ \mathbf{P}_4 \end{bmatrix} = \mathbf{G}\mathbf{P} \quad (50)$$

Tako kot pri vhodni matriki $\mathbf{H}$ se tudi pri izhodni matriki $\mathbf{G}$ pojavljajo izhodi le pri smiselnih kombinacijah prehodov med podsistemi, zato so pozitivne samo posamične podmatrike $\mathbf{G}_{ij}$:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{11} & 0 & 0 & \mathbf{G}_{14} \\ 0 & \mathbf{G}_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{G}_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{G}_{44} \end{bmatrix} \quad (51)$$

Skupno neto proizvodnjo sistema ($\mathbf{z}$) izračunamo kot:

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_1 \\ \mathbf{z}_2 \\ \mathbf{z}_3 \\ \mathbf{z}_4 \end{bmatrix} = \mathbf{y} - \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \\ \mathbf{y}_3 \\ \mathbf{y}_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \\ \mathbf{x}_3 \\ \mathbf{x}_4 \end{bmatrix} = (\mathbf{G} - \mathbf{H})\mathbf{P} \quad (52)$$

Neto proizvodnjo (prosti tok elementov) lahko opazujemo parcialno na nivoju posamičnega podsistema. Neto proizvodnja elementov, uporabljenih v proizvodnem podsistemu, je tako:

$$\mathbf{z}_1 = \mathbf{G}_{11}\mathbf{P}_1 + \mathbf{G}_{14}\mathbf{P}_4 - \mathbf{H}_{11}\mathbf{P}_1 - \mathbf{H}_{12}\mathbf{P}_2 \quad (53)$$

Neto proizvodnji, obravnavani v klasični teoriji planiranja materialnih potreb, tu dodamo uspešno reciklirane elemente $\mathbf{G}_{14}\mathbf{P}_4$, ki jih uporabimo v novem proizvodnem ciklu. Neto proizvodnjo distribuiranih elementov nadalje izrazimo kot:

$$\mathbf{z}_2 = \mathbf{G}_{22}\mathbf{P}_2 - \mathbf{H}_{22}\mathbf{P}_2 - \mathbf{H}_{23}\mathbf{P}_3 \quad (54)$$

Gre za razliko med izhodnimi elementi, ki so prostorsko realocirani, in vhodnimi elementi v distribucijski podsistem. Neto proizvodnja potrošnega podsistema je:

$$\mathbf{z}_3 = \mathbf{G}_{33}\mathbf{P}_3 - \mathbf{H}_{34}\mathbf{P}_4 \quad (55)$$

$\mathbf{z}_3$ so »novi« elementi, ki pred uporabo ne obstajajo; predstavljajo izrabljene končne proizvode. Kot zadnjo obravnavamo neto proizvodnjo reciklažnih aktivnosti:

$$\mathbf{z}_4 = \mathbf{G}_{44}\mathbf{P}_4 \quad (56)$$

$\mathbf{z}_4$ so »novi« elementi, ki pred reciklažo ne obstajajo; predstavljajo nerekiclrane elemente, ki jih odstranimo na deponije in predstavljajo izhod iz sistema.

Model temelji na naslednjih predpostavkah:

- 1) Vektor $\mathbf{H}_{11}\mathbf{P}_1$ predstavlja vhodni tok v sistem, ki zadovoljuje potrebe proizvodnega podsistema zaradi proizvodnih aktivnosti.

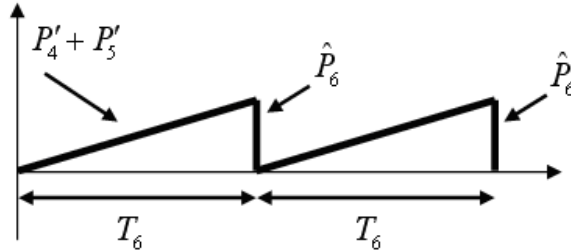
- 2) Vektor $\mathbf{H}_{21}\mathbf{P}_1 = 0$ predstavlja vhodni tok v sistem, ki zadovoljuje potrebe distribucijskega podsistema zaradi proizvodnih aktivnosti.
- 3) Vektor $\mathbf{H}_{31}\mathbf{P}_1 = 0$ predstavlja vhodni tok v sistem, ki zadovoljuje potrebe podsistema potrošnje zaradi proizvodnih aktivnosti.
- 4) Vektor $\mathbf{H}_{41}\mathbf{P}_1 = 0$ predstavlja vhodni tok v sistem, ki zadovoljuje potrebe podsistema reciklaže zaradi proizvodnih aktivnosti.
- 5) Vektor $\mathbf{H}_{12}\mathbf{P}_2$ predstavlja vhodni tok v sistem, ki zadovoljuje potrebe proizvodnega podsistema zaradi distribucijskih aktivnosti.
- 6) Vektor $\mathbf{H}_{22}\mathbf{P}_2 = 0$ predstavlja vhodni tok v sistem, ki zadovoljuje potrebe distribucijskega podsistema zaradi distribucijskih aktivnosti.
- 7) Vektor $\mathbf{H}_{32}\mathbf{P}_2 = 0$ predstavlja vhodni tok v sistem, ki zadovoljuje potrebe podsistema potrošnje zaradi distribucijskih aktivnosti.
- 8) Vektor $\mathbf{H}_{42}\mathbf{P}_2 = 0$ predstavlja vhodni tok v sistem, ki zadovoljuje potrebe podsistema reciklaže zaradi distribucijskih aktivnosti.
- 9) Vektor $\mathbf{H}_{13}\mathbf{P}_3 = 0$ predstavlja vhodni tok v sistem, ki zadovoljuje potrebe proizvodnega podsistema zaradi potrošnih aktivnosti.
- 10) Vektor $\mathbf{H}_{23}\mathbf{P}_3$ predstavlja vhodni tok v sistem, ki zadovoljuje potrebe distribucijskega podsistema zaradi potrošnih aktivnosti.
- 11) Vektor $\mathbf{H}_{33}\mathbf{P}_3 = 0$ predstavlja vhodni tok v sistem, ki zadovoljuje potrebe podsistema potrošnje zaradi potrošnih aktivnosti.
- 12) Vektor $\mathbf{H}_{43}\mathbf{P}_3 = 0$ predstavlja vhodni tok v sistem, ki zadovoljuje potrebe podsistema reciklaže zaradi potrošnih aktivnosti.
- 13) Vektor $\mathbf{H}_{14}\mathbf{P}_4 = 0$ predstavlja vhodni tok v sistem, ki zadovoljuje potrebe proizvodnega podsistema zaradi reciklažnih aktivnosti.
- 14) Vektor $\mathbf{H}_{24}\mathbf{P}_4 = 0$ predstavlja vhodni tok v sistem, ki zadovoljuje potrebe distribucijskega podsistema zaradi reciklažnih aktivnosti.
- 15) Vektor $\mathbf{H}_{34}\mathbf{P}_4$ predstavlja vhodni tok v sistem, ki zadovoljuje potrebe podsistema potrošnje zaradi reciklažnih aktivnosti.
- 16) Vektor $\mathbf{H}_{44}\mathbf{P}_4 = 0$ predstavlja vhodni tok v sistem, ki zadovoljuje potrebe podsistema reciklaže zaradi reciklažnih aktivnosti.

Na podoben način lahko interpretiramo tudi posamične izhodne tokove sistema $\mathbf{G}_{ij}\mathbf{P}_j$, pri čemer je $i, j = 1, 2, 3, 4$.

Grubbström et al. (2007) obravnavajo reciklažni podsistem na nivoju enega tipa končnega proizvoda, ki ga znotraj kontingentov P'_4 in P'_5 v obsegu 100 oziroma 200 enot distribuiramo na dve potrošni lokaciji. Elementi nato iz potrošnega podsistema vstopijo v reciklažni

podsystem v obliki kontingenta izrabljenih proizvodov $\hat{P}_6$. Dinamiko kopičenja zalog izrabljenih končnih izdelkov takšnega sistema znotraj period T_6 prikazujemo na Sliki 9.

Slika 9: Kopičenje zaloge izrabljenih končnih proizvodov v časovnih intervalih T_6



Vir: R.W. Grubbström, M. Bogataj in L. Bogataj, *A compact representation of distribution and reverse logistics in the value chain*, 2007, str. 46.

Materialni tok izrabljenih končnih proizvodov iz potrošnje je:

$$e^{-s\Delta_4} 100\tilde{P}_4(s) + e^{-s\Delta_5} 200\tilde{P}_5(s) = e^{-s(\Delta_4+t_4)} 100P'_4/s + e^{-s(\Delta_5+t_5)} 200P'_5/s \quad (57)$$

Pri tem predpostavljamo konstanten tok dveh procesov, ki se začneta v časih t_4 in t_5 . Vstop izrabljenih končnih proizvodov v podsystem reciklaže se izvaja ciklično s periodo T_6 :

$$e^{s\tau_6} \tilde{P}_6 = e^{s(\tau_6-t_6)} \hat{P}_6 / (1 - e^{-sT_6}) \quad (58)$$

Izhodni tok uspešno recikliranih komponent končnega proizvoda, pri čemer predstavlja α stopnjo reciklaže, je za zgoraj opisani vhodni tok komponent:

$$\alpha \tilde{P}_6(s) = e^{-s(\Delta_2+t_6)} \alpha \hat{P}_6 / (1 - e^{-sT_6}) \quad (59)$$

Poleg uspešno recikliranih komponent končnega proizvoda se v izhodnem toku pojavijo tudi odpadne komponente, ki svoj cikel zaključijo na deponiji:

$$(1 - \alpha) \tilde{P}_6(s) = e^{-s(\Delta_7+t_6)} (1 - \alpha) \hat{P}_6 / (1 - e^{-sT_6}) \quad (60)$$

Grubbström et al. (2007) uporabijo delovno silo kot dodaten vhodni parameter v proces reciklaže:

$$\tilde{L}(s) = e^{-st_6} \hat{L} / (1 - e^{-sT_6}) \quad (61)$$

Izračun neto sedanje vrednosti avtorji omejujejo zgolj na reciklažo izrabljenih končnih proizvodov znotraj enega cikla, pri čemer zanemarijo tokove iz celic aktivnosti drugih podsistemov:

$$NSV_{\text{reciklaže}} = \frac{(p_2 - p_7) A \hat{L}^\gamma \hat{P}_6^\delta + p_7 \hat{P}_6 - c_L \hat{L} - K_6}{1 - e^{-\rho \hat{P}_6 / P'_{4,5}}} - \frac{p_6 P'_{4,5}}{\rho} \quad (62)$$

Pomen posamičnih parametrov je naslednji:

- 1) p_2 : vrednost vrnjenih končnih proizvodov,
- 2) p_7 : ekološka dajatev na enoto končnega proizvoda,
- 3) p_6 : cena odkupa odpadnih/iztrošenih končnih proizvodov,
- 4) $\hat{P}_6$: velikost kontingenta izrabljenih končnih proizvodov, ki vstopijo v podsistem reciklaže,
- 5) T_6 : časovna perioda posamičnega cikla,
- 6) $P'_{4,5} = \hat{P}_6 / T_6$: vhodni tok končnih proizvodov, ki jih distribuiramo na dve različni lokaciji,
- 7) K_6 : vzpostavitevni strošek reciklažnega cikla,
- 8) $c_L \hat{L}$: strošek dela, izražen kot produkt cene na enoto c_L in količine dela $\hat{L}$, ki jo potrebujemo za izvedbo posamičnega reciklažnega cikla,
- 9) A, γ, δ : parametri Cobb-Douglasove proizvodne funkcije (Cobb in Douglas, 1928).

Prostorska dislociranost celic aktivnosti v globalnih oskrbovalnih verigah pomeni, da moramo med posamičnim parom celic aktivnosti upoštevati individualne časovne zakasnitve, do katerih prihaja na posamični relaciji (M. Bogataj & Grubbström, 2011a). Transportne časovne zakasnitve in transportni stroški torej vplivajo na optimalno izbiro prostorskih lokacij celic aktivnosti znotraj oskrbovalne verige, kar na primeru izbora dveh lokacij prikazujejo M. Bogataj, Grubbström in L. Bogataj (2011). V teh delih prikazana obravnava časovnih zakasnitev je vključena tudi na nivo reciklažnih procesov (M. Bogataj & Grubbström, 2011c), kar povzemamo v nadaljevanju tega podpoglavja.

Znotraj montažnega sistema, v katerem morajo biti komponente procesa j na voljo τ_j časovnih enot pred njegovim zaključkom in v katerem nastane dodatna transportna časovna zakasnitev τ_{ij} zaradi izvajanja transportnih aktivnosti med celicama aktivnosti i in j , izrazimo vhodne zahteve sistema z uporabo teorema prevedbe časa kot:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ h_{21}e^{s\tau_{21}} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n1}e^{s\tau_{n1}} & h_{n2}e^{s\tau_{n2}} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{s\tau_1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & e^{s\tau_m} \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{P}}(s) = \tilde{\mathbf{H}}(s)\tilde{\mathbf{P}}(s) \quad (63)$$

Če dodatno uvedemo čas Δ_{kj} , ki ga potrebujemo za transport posamičnega elementa od točke j do točke k , se izhodni elementi pojavijo v času $t + \Delta_k + \Delta_{kj}$. Izhode procesa j na nivoju $P_j(t)$ v času t posledično zapišemo v splošni obliki kot $e^{-s(\Delta_{kj} + \Delta_k)} g_{kj} \tilde{P}_j(s)$ oziroma v matrični obliki kot:

$$\begin{bmatrix} e^{-s\Delta_1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & e^{-s\Delta_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_1 & g_{12}e^{-s\Delta_{12}} & \cdots & g_{1n}e^{-s\Delta_{1n}} \\ 0 & g_2 & \cdots & g_{2n}e^{-s\Delta_{2n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{P}}(s) = \tilde{\Delta}(s)\mathbf{G}^T \tilde{\mathbf{P}}(s) = \tilde{\mathbf{G}}(s)\tilde{\mathbf{P}}(s) \quad (64)$$

Kumulativni transportni stroški TrC , ki so rezultat distribucijskih aktivnosti med posamičnimi celicami aktivnosti, znižujejo neto sedanjo vrednost sistema v višini:

$$TrC = -\mathbf{U}^T \left(\tilde{\mathbf{\Pi}}_G(s)\tilde{\mathbf{P}}(s) + \tilde{\mathbf{\Pi}}_H(s)\tilde{\mathbf{P}}_0(s) \right) \quad (65)$$

Transportni stroški $h_{ij}b_{ij}\tau_{ij}$ znotraj matrike $\tilde{\mathbf{\Pi}}_H(s)$ se nanašajo na količino h_{ij} elementov znotraj posamičnega nivoja kosovnice (oziroma vhodne matrike $\mathbf{H}$), pri kateri se pojavi vhodna transportna časovna zakasnitev τ_{ij} in transportni strošek b_{ij} na časovno enoto za vsak posamični element, ki ga distribuiramo iz točke i v točko j :

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{\Pi}}_H(s) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & h_{ij}b_{ij}\tau_{ij} & \ddots & \vdots \\ h_{m1}b_{m1}\tau_{m1} & \cdots & h_{mj}b_{mj}\tau_{mj} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \tilde{\boldsymbol{\tau}}^{pr}(s) = \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & h_{ij}b_{ij}\tau_{ij} & \ddots & \vdots \\ h_{m1}b_{m1}\tau_{m1} & \cdots & h_{mj}b_{mj}\tau_{mj} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{s\tau_1^{pr}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & e^{s\tau_m^{pr}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (66)$$

Transportni stroški $g_{kj}b_{kj}\Delta_{kj}$ znotraj matrike $\tilde{\mathbf{\Pi}}_G(s)$ se nanašajo na količino g_{kj} elementov znotraj posamičnega nivoja kosovnice (oziroma izhodne matrike $\mathbf{G}$), pri kateri se pojavi

izhodna transportna časovna zakasnitev Δ_{kj} in transportni strošek b_{kj} na časovno enoto za vsak posamični element, ki ga distribuiramo iz točke j v točko k :

$$\begin{aligned}\tilde{\Pi}_G(s) &= \tilde{\Delta}^{pr}(s) \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \cdots & g_{kj}b_{kj}\Delta_{kj} & \vdots \\ 0 & & \cdots & \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} e^{-s\Delta_1^{pr}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & e^{-s\Delta_n^{pr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \cdots & g_{kj}b_{kj}\Delta_{kj} & \vdots \\ 0 & & \cdots & \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (67)$$

Opisani model celostne oskrbovalne verige nadalje proučujejo in nadgrajujejo številna dela, raziskovalci pa svoje rezultate predstavljajo na različnih mednarodnih konferencah in simpozijih. Te nadgradnje modela smiselno vključujemo in podrobneje razlagamo v tretjem poglavju doktorske disertacije. V nadaljevanju tega podpoglavja navajamo samo njihove kratke povzetke in reference.

Kovačić in L. Bogataj (2009a) zapišeta strukturo vhodne matrike $\mathbf{H}$ in izhodne matrike $\mathbf{G}$ v splošni obliki, in sicer za neomejeno število nivojev kosovnice. Pri tem upoštevata vse fizično mogoče materialne tokove v sistemu, kar vključuje tudi izločitev komponent in končnih proizvodov iz proizvodnega in distribucijskega podsistema, ki je lahko posledica nezadostne ravni kvalitete, fizičnih poškodb, pretečenega roka trajanja ali prekomerne proizvodnje. Avtorja predstavita tudi idejo ločitve fizičnih tokov od informativnih tokov znotraj navideznih oskrbovalnih verig (Kovačić & L. Bogataj, 2009b).

Navidezne tokove, pri katerih je fizični tok proizvodov ločen od informacijskega in finančnega toka, nadalje podrobneje proučujejo L. Bogataj, Kisperska, M. Bogataj in Kovačić (2009a, 2009b) ter Kovačić in L. Bogataj (2011b).

V modelu je mogoče slediti vsakemu posamičnemu elementu z najnižjega nivoja kosovnice skozi več različnih ciklov celostne oskrbovalne verige, kar predstavljata Kovačić in L. Bogataj (2011a). Takšna razširitev modela omogoča, da za posamični element ugotovimo število ponovnih vstopov v cikel, preden ga dokončno izločimo iz sistema kot odpad. Na nivoju posamičnega elementa omogoča tudi spremljanje izhodne celice aktivnosti, iz katere preide v reciklažni podsistem. Izhodna celica aktivnosti se lahko pojavi v poljubnem podsistemu modela. Element lahko torej izstopi iz poljubnega nivoja proizvodnje, distribucije ali potrošnje. Slabost takšne razširitve modela je izrazit porast njegove kompleksnosti, kar predvsem pri sistemih z močno razvejanimi kosovnicami omejuje njegovo uporabo.

Kovačić in M. Bogataj (2011a) vključita časovne zakasnitve v splošno formulacijo input-output modela planiranja materialnih potreb na nivoju štirih podsistemov. Rezultate teh raziskav predstavlja tudi Kovačić (2011). V takšnem modelu neto sedanje vrednosti ne izračunavamo več parcialno na nivoju posamičnega izrabljenega končnega proizvoda na nivoju reciklažnega podsistema, temveč kot neto sedanjo vrednost celotnega sistema, ki sestoji iz vseh štirih podsistemov. Ta razširitev omogoča opazovanje sistema kot celote ter ocenjevanje njegove ekonomičnosti preko izračuna neto sedanje vrednosti. Opazujemo lahko obnašanje celotnega sistema ob spremembi vsakega posamičnega parametra znotraj katerekoli celice aktivnosti poljubnega podsistema.

Proizvodni in reciklažni procesi so energijsko potratni, cene energentov pa dosegajo rekordne vrednosti, zato v model razširjene teorije planiranja materialnih potreb kot enega od vhodnih parametrov vključimo tudi energijo. Vpliv v sistem dovedene energije na izračun optimalnih stopenj reciklaže z uporabo proizvodnih funkcij najdemo pri Kovačiću in M. Bogataj (2011b, 2012b). Stroškovni vidik energije oziroma njen vpliv na izračun neto sedanje vrednosti sistema, kjer lahko energijo tudi povratno pridobivamo med izvajanjem reciklažnih aktivnosti ali razpadom odpadnih elementov, raziskujeta Kovačić in M. Bogataj (2012a). Integracijo vključitve energije v razširjeno teorijo planiranja materialnih potreb izvedeta z uvedbo generalizirane vhodne energetske matrike $\tilde{\mathbf{E}}_H(s)$ in izhodne energetske matrike $\tilde{\mathbf{E}}_G(s)$, ki pokrivata vhodne in izhodne energijske tokove celotnega sistema.

2.5 SIMULACIJE

Simulacije so izredno močne in razširjene znanstvene tehnike za analizo in proučevanje kompleksnih sistemov (Winston, 1997). Simulacijske tehnike namreč simulirajo delovanje sistemov realnega sveta. Izvajamo jih na podlagi modela, ki temelji na predpostavkah delovanja sistema in ki je izražen v matematično-logičnih povezavah med njegovimi objekti. Namen simulacij je opazovanje delovanja sistema ob spreminjajočih se vhodnih parametrih v različnih časovnih trenutkih.

Z različnimi matematičnimi metodami je mogoče optimizirati raznovrstne probleme. Tako dobljene rešitve pa se v praksi ne izkažejo vedno kot optimalne (Bachelet & Yon, 2007). Optimalne rešitve namreč običajno niso dovolj robustne, da bi ob morebitni spremembi strukture problema ohranile svojo optimalnost. Optimalna rešitev pa se lahko bistveno spremeni tudi z uvedbo novih, sprva nepredvidenih omejitev modela. Bachelet in Yon (2007) kot pomemben dejavnik, ki vpliva na zanesljivost optimalnih rešitev, poudarjata poenostavitve, ki so vedno prisotne pri modeliranju problemov realnega sveta. Rezultat teoretično optimalne rešitve torej ne sovпада vedno z optimalno rešitvijo problema realnega sveta. Bachelet in Yon (2007) rešitev za to težavo vidita v kombinaciji optimizacijsko-simulacijskih metod, s čimer optimalno rešitev bolj približata realnemu problemu.

Podobne zaključke predstavita tudi Van Dijk in Van der Sluis (2008), ki najdeta stično točko med operacijskimi raziskavami in simulacijami na treh možnih nivojih:

- 1) metode operacijskih raziskav predlagajo različne scenarije, med katerimi s pomočjo simulacij izberemo optimalnega,
- 2) optimizacijske tehnike operacijskih raziskav uporabimo kot nadgradnjo rezultatov, pridobljenih s simulacijami,
- 3) optimizacijske tehnike operacijskih raziskav so integrirane v simulacijski model.

Kombinacija optimizacijskih metod operacijskih raziskav in simulacijskih tehnik lahko v določenih primerih da optimalne rezultate, kar avtorja dokazujeta tudi na konkretnih primerih. Naloge obeh vrst iskanja najboljše praktične rešitve v grobem ločujeta na naslednji način:

- 1) simulacije so primarno uporabne za ocenjevanje rešitev,
- 2) operacijske raziskave pa za njihovo optimizacijo.

Naraščajoča kompleksnost simulacijskih modelov otežuje vrednotenje njihove pravilnosti. Min, Yang in Wang (2010) na kratko povzemajo pomembnejša dela s področja vrednotenja simulacijskih modelov in izpostavijo vpliv naraščanja kompleksnosti strukture na obnašanje simulacijskih modelov. Tovrstna kompleksnost zahteva nadomestitev klasičnih statističnih pristopov za vrednotenje simulacijskih modelov s sodobnejšimi pristopi, ki temeljijo na znanju.

Na področju operacijskih raziskav se simulacije najpogosteje uporabljajo v proizvodnih sistemih, logistiki in čakalnih vrstah. To področje je široko raziskano, nekaj konkretnih primerov simulacij proizvodnih modelov pa med drugim podajajo Chen, Lee in Selikson (2002); Guo, Liao, Cheng in Liu (2006); Habchi in Berchet (2003) ter v povezavi s planiranjem materialnih potreb De Smet in Gelders (1998). Pod Köchlovim okriljem nastane tudi nekaj vidnejših prispevkov s področja simulacij proizvodnih procesov in planiranja zalog v srednjeevropskem območju (Köchel, 2009; Köchel & Nieländer, 2002, 2005; Köchel & Thiem, 2011).

Höferle (2008) se ukvarja s simulacijami s področja razširjene teorije planiranja materialnih potreb, ki vključuje tudi povratno logistiko. S pomočjo simulacij prikaže, da rast tehnološkega parametra A iz Cobb-Douglasove proizvodne funkcije ob nespremenjenih drugih parametrih povzroči povečanje stopnje reciklaže α oziroma deleža elementov, ki jih lahko ponovno uporabimo v novem proizvodnem ciklu, pri čemer se količina dela L ne spremeni. Sprememba parametra γ kaže na spremembo tehnologije v procesu reciklaže, ki zahteva večji vložek dela in povzroči povečanje stopnje reciklaže. S simulacijami torej potrjuje pozitiven vpliv tehnološkega razvoja na stopnjo reciklaže, kar se odrazi v pozitivnih vplivih na okolje. Na višino stopnje reciklaže v veliki meri vpliva tudi kvaliteta proizvodov ob koncu njihovega življenjskega cikla. S simulacijami prikaže, da višje okoljske dajatve stimulirajo reciklažne aktivnosti, prav tako pa višja cena izrabljenega proizvoda dviguje neto sedanjo vrednost sistema. Višje cene dela se odrazijo v znižanju neto sedanje vrednosti sistema ter posledično znižanju stopnje reciklaže in količine vloženega dela. Simulacijski model, ki ga uporablja

Höferle, pa temelji na reciklaži izključno končnega proizvoda ob koncu njegove življenjske dobe ter ne dovoljuje dodatnih vhodnih tokov iz podsistemov proizvodnje in distribucije. Problematiko obravnava na nivoju enega materialnega toka, ki se pojavlja izključno znotraj reciklažnega podsistema, ne pa kot celoto na nivoju vseh štirih podsistemov celostne oskrbovalne verige.

Kovačić (2010) razvije simulacijski model vrednotenja neto sedanje vrednosti reciklažnih aktivnosti v odvisnosti od input-output modela razširjene teorije planiranja materialnih potreb z vključenimi vsemi materialnimi tokovi v reciklažni podsistem. S pomočjo simulatorja izračuna vrednosti za vsak posamični materialni tok znotraj sistema, te parcialne vrednosti pa na koncu sešteje v kumulativno neto sedanjo vrednost vseh reciklažnih aktivnosti. Simulator omogoča izdelavo poglobljenih analiz obnašanja sistema ob spremembi posamičnega parametra, kar odpira dodatne možnosti za nadaljnje raziskovanje. Simulacijski model pa ne vključuje časovnih zakasnitev znotraj posamičnih podsistemov in stroškov prehoda med posamičnimi celicami aktivnosti (transportnih stroškov). Kovačić in M. Bogataj (2012c) zato predstavita nadgrajeni simulacijski model, ki vključuje razširjeni nabor vhodno-izhodnih parametrov. Razširjeni simulacijski model tako vsebuje časovne zakasnitve, do katerih prihaja znotraj posamičnih vozlov in pri poljubnem prehodu med sosednjima celicama aktivnosti, kjer je tak prehod fizično mogoč. V simulacije vključita še delovno silo in energijo kot vhodna parametra, ki bistveno vplivata na ekonomičnost celotnega sistema. Upoštevata pa tudi druge okoljske dejavnike: okoljske dajatve, subvencije reciklirane energije, tehnološke možnosti reciklaže, časovne zakasnitve pri reciklaži in stroške deponiranja odpadnih elementov. V svojem delu dokažeta, da so simulacije uporabno orodje za proučevanje kompleksnih procesov, ki se odvijajo znotraj modela razširjene teorije planiranja materialnih potreb ter omogočajo poglobljen vpogled v obnašanje oskrbovalnih verig pri spremembi posamičnih vhodnih parametrov.

V raziskovalnem delu, ki ga predstavljamo v tej doktorski disertaciji, so simulacije uporabljene za lažje opazovanje obnašanja relativno kompleksnega modela štirih osnovnih podsistemov v razširjeni teoriji planiranja materialnih potreb, ki vključuje tudi vse dovoljene prehode med posamičnimi celicami aktivnosti ter energijo kot vhod in izhod sistema. S pomočjo simulacij, pri katerih spreminjamo posamični vhodni parameter, preverjamo pravilnost razširjenega modela, hkrati pa opazujemo njegovo obnašanje in zakonitosti.

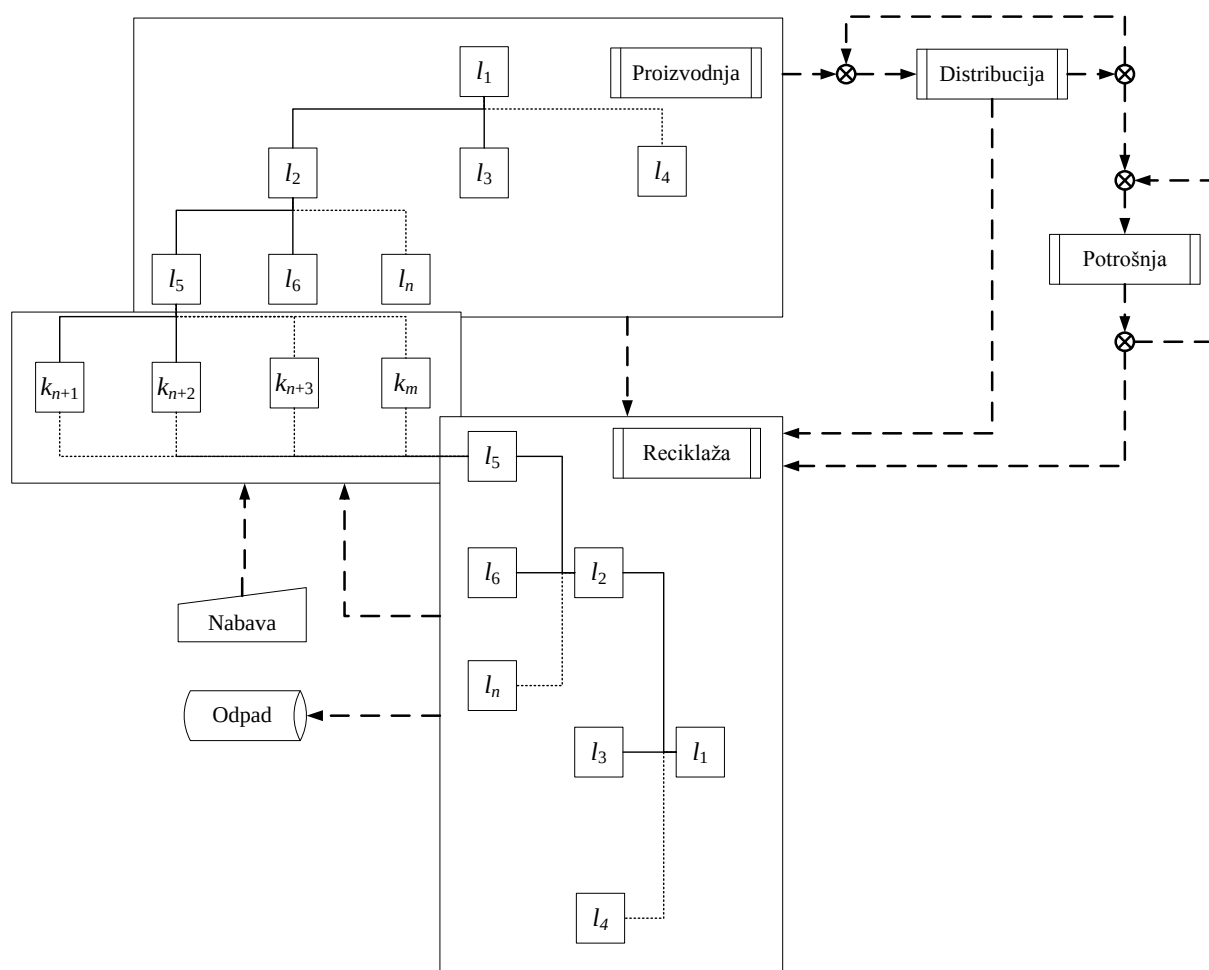
3 NADGRADNJA MODELA IN SIMULACIJE

3.1 VKLJUČITEV VSEH PODSISTEMOV OSNOVNEGA MODELA

Shematičen prikaz vseh štirih osnovnih podsistemov osnovnega modela in v realnem svetu dovoljenih prehodov znotraj njih in med njimi prikazujemo na Sliki 10. Vsak posamični cikel se začne s proizvodnjo na podlagi kosovnice, katere rezultat je končni proizvod l_1 . Končni proizvod distribuiramo na različne lokacije, kjer ga znotraj potrošnega podsistema tekom njegovega življenjskega cikla izrabimo. Svoj krogotok zaključi v reciklažnem podsistemu, v katerem izvedemo demontažo na podlagi obratne kosovnice. Na Sliki 10 prikazujemo tudi druge možne tokove med podsistemi, in sicer neposredne prehode iz katerekoli celice aktivnosti podsistemov proizvodnje, distribucije in potrošnje v reciklažni podsistem. Iz podsistema reciklaže izhajata dva tokova, in sicer:

- 1) povratni tok v proizvodni podsistem in
- 2) tok odpadnih elementov na deponijo.

Slika 10: Prikaz tokov znotraj vseh podsistemov proučevanega modela in med njimi s štirimi osnovnimi podsistemi



Večnivojski montažni sistem lahko predstavimo s kosovnico, v kateri je končni proizvod oziroma polizdelek na določenem nivoju kosovnice sestavljen iz polizdelkov oziroma osnovnih gradnikov (primarnih surovin), ki so natanko en nivo nižje od njega. Elemente, ki v obliki primarnih surovin vstopajo v sistem na najnižjem nivoju kosovnice in ki se uporabijo pri sestavljanju komponent na višjem nivoju v kosovnici, na Sliki 10 označujemo s k_{n+1} , k_{n+2} , ..., k_m . To so osnovni elementi, ki jih ne moremo razstaviti na manjše dele. V sistem vstopajo kot novi vhodni elementi, ki so rezultat nabavnih aktivnosti na trgu surovin, ali pa krožijo znotraj njega kot rezultat uspešno izvedenih reciklažnih aktivnosti. Pri zaprtem sistemu, v katerem elementi krožijo skozi več zaporednih ciklov, predpostavljamo, da se zaloge na nobenem nivoju ne akumulirajo daljše časovno obdobje. Nereciklirane elemente izločimo na deponijo v obliki odpadkov, za kar moramo plačati pripadajoče okoljske dajatve. Ker takšen sistem z več zaporednimi cikli obravnavamo kot zaprt, moramo pred začetkom vsakega novega cikla odpadno količino elementov nadomestiti z nakupom enake količine novih elementov na primarnem trgu surovin. Z uporabo osnovnih enačb teorije planiranja materialnih potreb lahko odpadne elemente označimo kot izhode sistema oziroma njegovo neto proizvodnjo, ki jo v osnovnih enačbah označujemo kot $\tilde{F}(s)$.

V reciklažni podsistem vstopajo končni izdelek in njegove komponente s katerekoli stopnje montažnega sistema. To pomeni, da vstopijo v reciklažni podsistem iz kateregakoli nivoja proizvodnje, distribucije ali potrošnje. Z l_2 , l_3 , ..., l_n označimo sestavljene komponente z različnih nivojev kosovnice, ki jih potrebujemo v procesu montaže višje ležečih komponent oziroma končnih izdelkov. Te komponente lahko v primeru neustrezne ravni kvalitete, poškodbe ali presežne proizvodnje zapustijo proizvodni podsistem in se izločijo neposredno v reciklažni podsistem. Takšne komponente nikdar ne dosežejo končnega nivoja montažnega sistema in nikdar ne nastopijo kot gradnik končnega proizvoda. Element z najvišjega nivoja kosovnice l_1 , ki predstavlja končni proizvod, pa preko distribucijskih aktivnosti dostavimo do končnih porabnikov (celic aktivnosti) v potrošnem podsistemu. Distribucija torej predstavlja transport končnih izdelkov iz proizvodnega podsistema na različne lokacije (1, 2, ..., r), kjer jih prodamo in nadaljujejo svoj cikel v podsistemu potrošnje.

Končni proizvod l_1 v določenih primerih zaradi podobnih razlogov kot njegove sestavne komponente l_2 , l_3 , ..., l_n ne doseže končnih porabnikov, ampak ga izločimo neposredno v reciklažni podsistem. Končni proizvod lahko iz distribucijskega podsistema preide neposredno v reciklažni podsistem zaradi poškodbe oziroma izgub med transportom oziroma kot rezultat odvečne proizvodnje (npr. neprodani izdelki, ki nikdar ne vstopijo v potrošnjo). Ne glede na izvirno celico aktivnosti vsaka sestavljena komponenta preide v reciklažni podsistem, kjer jo razstavimo v obratnem vrstnem redu, kot smo jo sestavili. Tako razstavljeni elementi lahko končajo kot odpadki na deponiji ali pa krožijo v sistemu kot vhodni elementi novega cikla, ki se začne v proizvodnem podsistemu.

Za ustrezno ciklično obravnavo predpostavimo zaprt sistem s ponovno uporabo recikliranih elementov. Znotraj njega se noben element sistema ne more izgubiti, tudi odpad obravnavamo

kot sestavni del celotnega sistema. Vsak element z najnižjega nivoja kosovnice tako zaključi svoj cikel bodisi kot recikliran element, s čimer vstopi v nov proizvodni cikel, bodisi kot odpadke, ki ga odložimo na deponijo. Predpostavka zaprtega sistema je realna, saj mora vsak element sistema slej ko prej zaključiti svoj življenjski cikel in noben element ne more ostati znotraj posamičnega podsistema neskončno dolgo časovno obdobje. Rezultat takšnega zaprtega sistema je, da nekateri elementi znotraj njega krožijo, nekateri pa se izločijo in nadomestijo z novimi.

Zaradi poenostavitve v nadaljevanju raziskovalnega dela predstavljamo model s samo enim končnim proizvodom l_1 in neskončnim številom nivojev komponent, ki ga sestavljajo. Model lahko relativno enostavno prilagodimo tako, da vsebuje več končnih proizvodov. Takšno obravnavo lahko dosežemo z enostavnim dodajanjem vrstic v vhodni in izhodni matriki za vsak dodatni končni proizvod. Opazovanje na nivoju enega končnega proizvoda v vhodno-izhodnih matrikah pa nam omogoča preglednejši prikaz rezultatov in njihovo analizo. Kadar želimo opazovati sistem z več končnimi proizvodi, jih je zato bolj smiselno izločiti in obravnavati ločeno v samostojnih vhodno-izhodnih matrikah.

3.1.1 Zapis vhodne matrike v splošni obliki

Vhodna matrika $\mathbf{H}$ predstavlja vhodne zahteve sistema. Njene pozitivne podmatrike $\mathbf{H}_{ij}$ so tam, kjer se vhodne zahteve tudi dejansko pojavljajo. Vhodno matriko proučevanega razširjenega modela zapišemo v naslednji splošni obliki:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{11} & \mathbf{H}_{12} & 0 & \mathbf{H}_{14} \\ 0 & 0 & \mathbf{H}_{23} & \mathbf{H}_{24} \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{H}_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (68)$$

Posamična podmatrika $\mathbf{H}_{ij}$ predstavlja zahteve po elementih podsistema i zaradi izvajanja procesov v podsistemu j , pri čemer predstavlja indeks

- 1) 1 – proizvodni podsistem,
- 2) 2 – distribucijski podsistem,
- 3) 3 – potrošni podsistem in
- 4) 4 – reciklažni podsistem.

Podmatrika $\mathbf{H}_{11}$ tako predstavlja zahteve po elementih proizvodnega podsistema zaradi proizvodnih aktivnosti; gre za montažni sistem, predstavljen s kosovnico. Podmatrika $\mathbf{H}_{12}$ predstavlja zahteve po elementih proizvodnega podsistema zaradi distribucijskih aktivnosti, $\mathbf{H}_{14}$ zahteve po elementih proizvodnega podsistema zaradi reciklažnih aktivnosti, $\mathbf{H}_{23}$ zahteve po elementih distribucijskega podsistema zaradi potrošnih aktivnosti, $\mathbf{H}_{24}$ zahteve po elementih distribucijskega podsistema zaradi reciklažnih aktivnosti in $\mathbf{H}_{34}$ zahteve po

elementih potrošnega podsistema zaradi reciklažnih aktivnosti. Vhodna matrika $\mathbf{H}$ torej pokriva vse vhodne tokove celotnega sistema, ki ga prikazujemo na Sliki 10.

Posamične podmatrice $\mathbf{H}_{ij}$ vhodne matrike $\mathbf{H}$, pri čemer je $i = 1$, zapišemo v splošni obliki za neomejeno število celic aktivnosti na kateremkoli nivoju sistema na naslednji način:

$$\mathbf{H}_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \hline h_{31}^{11} & 0 & h_{33}^{11} & \dots & h_{3n}^{11} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \hline h_{51}^{11} & h_{52}^{11} & 0 & \dots & h_{5n}^{11} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hline h_{(2n-1)1}^{11} & h_{(2n-1)2}^{11} & h_{(2n-1)3}^{11} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \hline h_{(2n+1)1}^{11} & h_{(2n+1)2}^{11} & h_{(2n+1)3}^{11} & \dots & h_{(2n+1)n}^{11} \\ h_{(2n+2)1}^{11} & h_{(2n+2)2}^{11} & h_{(2n+2)3}^{11} & \dots & h_{(2n+2)n}^{11} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m1}^{11} & h_{m2}^{11} & h_{m3}^{11} & \dots & h_{mn}^{11} \end{bmatrix}, \mathbf{H}_{12} = \begin{bmatrix} h_{11}^{12} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{H}_{14} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ h_{21}^{14} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & h_{42}^{14} & 0 & \dots & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & h_{63}^{14} & \dots & 0 \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hline 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & h_{(2n)n}^{14} \\ \hline 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (69)$$

Koeficienti h_{kl}^{11} podmatrice $\mathbf{H}_{11}$ predstavljajo zahtevane količine elementov, ki jih potrebujemo za sestavo ene enote elementa na natanko enem nivoju višje. Gre pravzaprav za kosovnico, ki je v našem primeru razširjena še s tokom vsakega sestavljenega elementa (ne glede na njegov nivo nahajanja) v reciklažni podsistem. Ker gre za montažni sistem, v katerem se vedno uporabijo fizično obstoječi elementi, mora biti vedno zadoščeno pogoju: $h_{kl}^{11} \geq 0$.

Zgornji del podmatrice $\mathbf{H}_{11}$ vsebuje koeficiente od h_{11}^{11} do $h_{(2n)n}^{11}$, s čimer prikazujemo, koliko komponent (polizdelkov) k je potrebnih za proizvodnjo ene komponente (polizdelka oziroma končnega izdelka) l na višje ležečem nivoju. Vsak element k zapišemo v dveh vrsticah, pri čemer je vsaka vrstica $2k$ sestavljena samo iz ničelnih koeficientov, saj predstavlja izstop komponente k iz proizvodnega podsistema v reciklažni podsistem. Ta vzporedni izhodni tok pa vključimo v podmatriko $\mathbf{H}_{14}$. Vrstice $2k-1$ matrike $\mathbf{H}_{11}$ v skladu s kosovnico vsebujejo tudi pozitivne člene. Pri tem velja, da se za $k = 1$ pojavljajo izključno koeficienti 0, saj gre za končni proizvod, ki ni uporabljen v nadaljnjih proizvodnih procesih, ampak preide v enega od naslednjih podsistemov. Koeficienti so ničelni tudi pri $k = l$, saj posamična komponenta ne more biti uporabljena v svojem lastnem proizvodnem procesu.

V vsaki sodi vrstici $2k$ v zgornjem delu podmatrike $\mathbf{H}_{14}$ predstavimo vhodne koeficiente v reciklažni podsistem zaradi proizvodnih aktivnosti za vsako posamično komponento k , pri čemer je $k = 1, 2, \dots, n$. Gre za odvečno proizvodnjo, neporabljene zaloge komponent in komponente, ki ne dosegajo zahtevanih kakovostnih meril za nadaljnjo vgradnjo. Podmatrika $\mathbf{H}_{14}$ ima neničelne elemente samo v primerih, kadar je $k = 2l$, saj v reciklažo vstopajo samo sestavljene komponente $1, 2, \dots, n$, pri čemer $n = 1$ predstavlja končni proizvod.

Ker obravnavamo model, ki temelji na enem končnem proizvodu, ima podmatrika $\mathbf{H}_{12}$ le en pozitiven element (h_{11}^{12}), ki predstavlja vhodni koeficient v distribucijo zaradi proizvodnih aktivnosti. Koeficienti h_{kl}^{12} in h_{kl}^{14} znotraj podmatrik $\mathbf{H}_{12}$ in $\mathbf{H}_{14}$ so deleži celotne proizvodnje komponente k , ki vstopa v distribucijski oziroma neposredno v reciklažni podsistem. Te deleže označimo z β_{ij} , pri čemer predstavlja ij tok iz podsistema i v podsistem j in mora biti zadoščeno naslednjima pogojema:

$$0 \leq \beta_{ij} \leq 1; \quad \sum_{i=1}^4 \beta_{ij} = 1 \quad (70)$$

Spodnji del podmatrike $\mathbf{H}_{11}$ vsebuje koeficiente od $h_{(2n+1)1}^{11}$ do h_{mn}^{11} , ki povejo, koliko osnovnih elementov k potrebujemo za izgradnjo ene komponente l , ki se nahaja na enem nivoju višje znotraj kosovnice. Ti osnovni elementi so primarne surovine, ki jih ne moremo dodatno razstaviti. V sistem vstopajo kot novi elementi, kupljeni na trgu, ali kot obstoječi elementi sistema, ki znotraj njega krožijo zaradi izvajanja reciklažnih aktivnosti. Ker so ti elementi osnovni in jih ni mogoče dodatno razstavljati, ne bodo nikdar vstopili neposredno v reciklažni podsistem. To pomeni, da bo vsak osnovni element k vedno predstavljen zgolj v eni vrstici.

Druga vrstica celostne matrike $\mathbf{H}$ ($i = 2$) vsebuje dve podmatriki z neničelnimi elementi:

$$\mathbf{H}_{23} = \begin{bmatrix} h_{11}^{23} \\ \vdots \\ h_{r1}^{23} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_{24} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ h_{(r+1)1}^{24} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (71)$$

Koeficienti h_{r1}^{23} predstavljajo deleže končnega proizvoda, ki ga distribuiramo na lokacije $1, 2, \dots, r$ zaradi zahtev potrošnega podsistema. Na podoben način opišemo koeficiente $h_{(r+1)1}^{24}$, ki prikazujejo deleže končnega proizvoda, ki vstopi v reciklažni podsistem zaradi distribucijskih aktivnosti. Ta tok predstavlja končne proizvode, ki se poškodujejo med transportom ali pa se jim izteče življenjska doba pred vstopom v potrošnjo (na primer hitro

pokvarljivo blago ali blago, ki tehnološko zastari, preden je prodano na trgu). Koeficiente h_{r1}^{23} v splošni obliki definiramo kot:

$$h_{r1}^{23} = \beta_{12} * \beta_{23} * \mu_r \quad (72)$$

Pri tem so μ_r deleži končnega proizvoda, ki ga distribuiramo na lokacije 1, 2, ..., r . Zadoščeno mora biti naslednjima pogojema:

$$0 \leq \mu_r \leq 1; \quad \sum_{r=1}^r \mu_r = 1 \quad (73)$$

Koeficient $h_{(r+1)1}^{24}$ v splošni obliki definiramo kot:

$$h_{(r+1)1}^{24} = \beta_{12} * \beta_{24} \quad (74)$$

Zadnja neničelna podmatrika $\mathbf{H}_{34}$ znotraj vhodne matrike $\mathbf{H}$ predstavlja vhodne zahteve reciklaže zaradi potrošnih aktivnosti. Z njo torej zajemamo tok izrabljenih izdelkov, ki na koncu svoje življenjske dobe vstopijo v proces reciklaže:

$$\mathbf{H}_{34} = \begin{bmatrix} h_{11}^{34} & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (75)$$

Podmatrika $\mathbf{H}_{34}$ ima samo en neničelni koeficient h_{11}^{34} , saj lahko vse izrabljene končne izdelke obravnavamo znotraj enotnega kontingenta, ki ga definiramo kot produkt vseh koeficientov prehodov med posamičnimi podsistemi:

$$h_{11}^{34} = \beta_{12} * \beta_{23} * \beta_{34} \quad (76)$$

Končni izdelki, zajeti v podmatriki $\mathbf{H}_{34}$, so torej šli skozi vse štiri podsisteme opazovanega modela.

3.1.2 Zapis izhodne matrike v splošni obliki

Izhodna matrika sestoji iz izhodnih koeficientov posamičnega podsistema, njene pozitivne podmatrike pa se pojavljajo tam, kjer elementi zapustijo posamični podsistem. Upoštevajoč vse tokove opazovanega modela, ki ga prikazujemo na Sliki 10, strukturiramo izhodno matriko $\mathbf{G}$, ki po dimenziji vedno sovпада z vhodno matriko $\mathbf{H}$, v naslednji splošni obliki:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{11} & 0 & 0 & \mathbf{G}_{14} \\ 0 & \mathbf{G}_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{G}_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{G}_{44} \end{bmatrix} \quad (77)$$

Posamična podmatrika $\mathbf{G}_{ij}$ predstavlja izhode podsistema j zaradi aktivnosti znotraj podsistema i . Njene pozitivne podmatrke $\mathbf{G}_{11}$, $\mathbf{G}_{22}$ in $\mathbf{G}_{33}$ so torej rezultat (izhod) aktivnosti podsistemov proizvodnje, distribucije in potrošnje ter jih v splošni obliki zapišemo:

$$\mathbf{G}_{11} = \begin{bmatrix} g_{11}^{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ g_{21}^{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \hline 0 & g_{32}^{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & g_{42}^{11} & 0 & \dots & 0 \\ \hline 0 & 0 & g_{53}^{11} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & g_{63}^{11} & \dots & 0 \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hline 0 & 0 & 0 & \dots & g_{(2n-1)n}^{11} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & g_{(2n)n}^{11} \\ \hline 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_{22} = \begin{bmatrix} g_{11}^{22} \\ \vdots \\ g_{r1}^{22} \\ g_{(r+1)1}^{22} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_{33} = [g_{11}^{33}] \quad (78)$$

Podmatrika $\mathbf{G}_{11}$ sestoji iz izhodnih koeficientov proizvodnega podsistema in po dimenziji sovpada s podmatrko $\mathbf{H}_{11}$. Izhodni tok vsake izmed komponent k predstavimo v dveh vrsticah, pri čemer vsebuje vrstica $2k$ koeficiente tokov iz proizvodnega podsistema neposredno v reciklažni podsistem, vrstica $2k-1$ pa koeficiente tokov znotraj proizvodnega podsistema. Gre torej za razmerje med izhodnim tokom komponent v nadaljnje faze proizvodnje in izhodnim tokom komponent v reciklažo. Izjema velja za $k = 1$, saj gre v tem primeru za končni proizvod, ki je na najvišjem nivoju kosovnice. Ker ga ne sestavljamo naprej, nadaljuje svoj cikel v distribucijskem podsistemu. Koeficient g_{11}^{11} predstavlja v tem primeru delež končnih proizvodov, ki vstopajo v distribucijski podsistem. Neničelni so lahko koeficienti $g_{(2l-1)l}^{11}$, ki predstavljajo deleže proizvedenih komponent l , ki se uporabijo v nadaljnjih montažnih aktivnostih, in pa koeficienti $g_{(2l)l}^{11}$, ki predstavljajo deleže teh komponent, ki izstopijo iz proizvodnje in končajo svoj cikel neposredno v reciklažnem podsistemu. Da bo model ustrezal razmeram realnega sveta, moramo torej zadostiti naslednjim pogojem:

$$g_{(2l)l}^{11} \geq 0 \quad (79)$$

$$g_{(2l-1)l}^{11} \leq 1 \quad (80)$$

$$g_{(2l)l}^{11} + g_{(2l-1)l}^{11} = 1 \quad (81)$$

Ti deleži sovpadajo s koeficienti β_{ij} , ki jih opisujemo pri posamičnih vhodnih podmatrikah $\mathbf{H}_{ij}$.

Podmatrika $\mathbf{G}_{22}$ vsebuje izhodne deleže distribucijskega podsistema. Koeficienti g_{r1}^{22} predstavljajo distribucijski tok do lokacij 1, 2, ..., r , koeficienti $g_{(r+1)1}^{22}$ pa tok končnih proizvodov neposredno v reciklažni podsistem. Koeficient g_{r1}^{22} definiramo kot:

$$g_{r1}^{22} = \beta_{12} * \beta_{23} * \mu_r \quad (82)$$

Koeficient $g_{(r+1)1}^{22}$ pa definiramo kot:

$$g_{(r+1)1}^{22} = \beta_{12} * \beta_{24} \quad (83)$$

To pomeni, da velja:

$$\sum_{r=1}^{r+1} g_{r1}^{22} = \beta_{12} \quad (84)$$

Na podoben način kot podmatriki $\mathbf{G}_{11}$ in $\mathbf{G}_{22}$ interpretiramo tudi podmatriko $\mathbf{G}_{33}$. Ta vsebuje delež celotne proizvedene količine končnega proizvoda g_{11}^{33} , ki izstopi iz potrošnega podsistema. Izračunamo ga na naslednji način:

$$g_{11}^{33} = \beta_{12} * \beta_{23} * \beta_{34} \quad (85)$$

Končni proizvodi iz potrošnega podsistema na koncu svojega življenjskega cikla v celoti vstopijo v reciklažni podsistem, kjer jih določen del recikliramo, del pa odstranimo na deponijo. Ta z okoljskega vidika izredno pomembna materialna tokova sta vključena v podmatrikah $\mathbf{G}_{14}$ in $\mathbf{G}_{44}$.

Podmatriki $\mathbf{G}_{14}$ in $\mathbf{G}_{44}$ igrata ključno vlogo z vidika reciklaže in ponovne uporabe elementov sistema, saj vsebujeta reciklažne koeficiente (stopnje reciklaže) α , ki določajo deleže

elementov oziroma gradnikov katerekoli komponente sistema, ki jih uspešno recikliramo in uporabimo v naslednjem proizvodnem ciklu. Uspešno reciklirani elementi postanejo vhodni elementi novega cikla, ki se začne s proizvodnim podsistemom. Drugi (nereciklirani) elementi pa izstopijo iz sistema kot odpadki, saj jih ne moremo uporabiti v naslednjih proizvodnih ciklih:

$$\mathbf{G}_{14} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \hline g_{(2n+1)1}^{14} & g_{(2n+1)2}^{14} & \cdots & g_{(2n+1)n}^{14} \\ g_{(2n+2)1}^{14} & g_{(2n+2)2}^{14} & \cdots & g_{(2n+2)n}^{14} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{m1}^{14} & g_{m2}^{14} & \cdots & g_{mn}^{14} \end{bmatrix} \quad (86)$$

$$\mathbf{G}_{44} = \begin{bmatrix} g_{11}^{44} & g_{12}^{44} & \cdots & g_{1n}^{44} \\ g_{21}^{44} & g_{22}^{44} & \cdots & g_{2n}^{44} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{(m-2n)1}^{44} & g_{(m-2n)2}^{44} & \cdots & g_{(m-2n)n}^{44} \end{bmatrix} \quad (87)$$

Podmatrika $\mathbf{G}_{14}$ vsebuje izhodne koeficiente reciklažnih aktivnosti, katerih rezultat so uspešno reciklirani elementi, ki jih uporabimo v naslednjem proizvodnem ciklu. Izhodni koeficienti nerecikliranih elementov znotraj reciklažnega podsistema pa so zajeti v podmatriki $\mathbf{G}_{44}$. Gre za odpadke, ki jih odstranimo na deponijo in za katere je treba plačati predpisane okoljske dajatve. Nereciklirane elemente sistema moramo v novem proizvodnem ciklu nadomestiti z novimi elementi, ki jih pridobimo z nabavnimi aktivnostmi na trgu surovin. Razmerje med podmatrikama $\mathbf{G}_{14}$ in $\mathbf{G}_{44}$ predstavlja stopnjo okoljskega ravnotežja celotnega sistema, ki bistveno vpliva na njegovo neto sedanjo vrednost, kar podrobneje analiziramo v naslednjih podpoglavjih.

Spodnji del podmatrike $\mathbf{G}_{14}$ po dimenziji vedno sovpada z $\mathbf{G}_{44}$. Izhajamo iz predpostavke, da je opazovani sistem zaprt in se noben izmed elementov sistema ne zadržuje na nobeni ravni daljše časovno obdobje, kar posledično pomeni, da slej ko prej vstopi v reciklažni podsistem, zato lahko za vsak k in l definiramo:

$$g_{kl}^{14} + g_{(k-2l)l}^{44} = h_{kl}^{11} \quad (88)$$

To pomeni, da vsaka sestavljena komponenta v nekem časovnem trenutku svojo pot zaključi v reciklažnem podsistemu, ne glede na nivo sistema, s katerega vstopi vanj. Koeficiente g_{kl}^{14} in $g_{(k-2l)l}^{44}$ definiramo kot:

$$g_{kl}^{14} = h_{kl}^{11} * \alpha_{kl} \quad (89)$$

$$g_{(k-2l)l}^{44} = h_{kl}^{11} * (1 - \alpha_{kl}) \quad (90)$$

Reciklažni koeficienti α_{kl} v proučevanem modelu so stopnje reciklaže osnovnih elementov sistema k , pridobljenih iz komponente l . Neničelne vrednosti se pojavijo samo v primeru, kadar je reciklirana komponenta l v kosovnici natanko en nivo nad elementom k , ki ga pridobimo z reciklažo. Dejanski reciklažni koeficient α_{kl} je odvisen od vseh koeficientov sistema α in β , ki predstavljajo tokove pred vstopom v reciklažni podsistem. Izračunamo ga na naslednji način:

$$\alpha_{kl} = \sum_{n'=l}^3 \left(\prod_{i=k, l-1, \dots, n', 4}^{n', 4} \beta_i \alpha_i \right)_{n'} \quad (91)$$

Indeks i predstavlja zaporedje celic aktivnosti od najnižjega do najvišjega nivoja. To zaporedje lahko zavzame katerokoli v realnosti dovoljeno kombinacijo vrednosti proizvodnega podsistema, predstavljenega v podmatriki $\mathbf{H}_{11}$, oziroma kateregakoli izmed preostalih treh podsistemov. Prvi parameter zaporedja vedno predstavlja element z najnižjega nivoja kosovnice, ki ga povratno pridobivamo z reciklažnimi aktivnostmi. Indeks n' predstavlja izhodno celico aktivnosti, iz katere element preide v reciklažni podsistem. Posledično se na koncu zaporedja vedno pojavi vrednost 4, ki predstavlja reciklažni podsistem. Če ilustriramo na primeru, bi zaporedje $i = k5, l4, l1, 2, 4$ pomenilo, da recikliramo osnovni element $k5$, ki se v proizvodnem podsistemu uporablja za sestavljanje komponente $l4$, ta pa se nadalje uporablja v montažnem procesu končnega proizvoda $l1$. Končni proizvod vstopi v distribucijski podsistem (2), nikdar pa ne vstopi v potrošnjo (3). Končni proizvod torej zaradi poškodbe, zastaranja ali drugega podobnega razloga preide iz distribucijskega podsistema neposredno v reciklažo ter se nikdar ne pojavi na trgu končnih proizvodov. Pomnožiti je torej treba vse koeficiente α_i in β_i , ki se pojavijo znotraj transformacij med posamičnimi celicami aktivnosti z nižjega na višji nivo:

- 1) reciklaža $k5$ iz $l4$,
- 2) reciklaža $l4$ iz $l1$,
- 3) prehod iz $l1$ v 2 in
- 4) prehod iz 2 v 4.

V tem primeru izstopno točko n' predstavlja distribucijski podsistem (2).

Pri reciklaži določenega elementa lahko pričakujemo različne reciklažne koeficiente α_i , ki so odvisni od izstopne točke n' . V splošnem lahko za element l , ki ga recikliramo iz elementa z višjega nivoja kosovnice $l-1$, pričakujemo, da bodo stopnje reciklaže višje, če bo reciklirana komponenta izstopila iz točke n' v reciklažo na nižjem nivoju celotnega sistema. Običajno lahko največ recikliranih elementov pridobimo iz komponent, ki v reciklažo vstopijo neposredno iz proizvodnega podsistema, saj še ni prišlo do njihove obrabe. Najnižje stopnje

reciklaže lahko po drugi strani pričakujemo v primeru, ko je $n' = 3$, torej takrat, ko recikliramo končne proizvode, ki so v reciklažo vstopili iz potrošnega podsistema. Končni proizvodi so namreč v večini primerov izrabljeni, zato je postopek reciklaže zahtevnejši oziroma v nekaterih primerih zaradi stopnje uničenja celo nemogoč. Običajno lahko pričakujemo, da bo po tej poti mogoče reciklirati manj elementov kot pa v primeru izstopa neposredno iz proizvodnega podsistema.

3.1.3 Zapis neto proizvodnje v splošni obliki

Vektor gostote tokov $\mathbf{P}$ predstavlja količine komponent l po posamičnih celicah aktivnosti znotraj posamičnega cikla (velikost posamičnih kontingentov). Ker predpostavljamo, da je sistem zaprt, lahko z vnaprej definiranim vektorjem $\mathbf{P}$ neto proizvodnjo $\mathbf{z}$ zapišemo v naslednji obliki:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 \\ \mathbf{P}_2 \\ \mathbf{P}_3 \\ \mathbf{P}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \\ \hline Q_1 \\ Q_1 \\ Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{z} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_1 \\ \mathbf{z}_2 \\ \mathbf{z}_3 \\ \mathbf{z}_4 \end{bmatrix} = (\mathbf{G} - \mathbf{H})\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ Q_{2n+1}^{14} \\ Q_{2n+2}^{14} \\ \vdots \\ Q_m^{14} \\ \hline 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \hline 0 \\ \hline Q_{2n+1}^{44} \\ Q_{2n+2}^{44} \\ \vdots \\ Q_m^{44} \end{bmatrix} \quad (92)$$

Ker v podsistema distribucije in potrošnje vstopa samo končni proizvod $l1$, vsebujeta parcialna vektorja $\mathbf{P}_2$ in $\mathbf{P}_3$ zgolj količine končnega proizvoda znotraj posamičnega cikla. Parcialna vektorja $\mathbf{P}_1$ in $\mathbf{P}_4$, ki se nanašata na proizvodni in reciklažni podsistem, pa vsebujeta tudi količine proizvedenih oziroma recikliranih komponent. Gre torej za kontingente elementov (komponent oziroma končnih proizvodov), ki se nahajajo znotraj posamične celice aktivnosti.

V neto proizvodnji opisuje vektor $\mathbf{z}_1$ neto proizvodnjo elementov, uporabljenih v proizvodnem podsistemu, $\mathbf{z}_2$ neto proizvodnjo distribucijskega podsistema, $\mathbf{z}_3$ neto proizvodnjo potrošnega podsistema in $\mathbf{z}_4$ neto proizvodnjo reciklažnega podsistema.

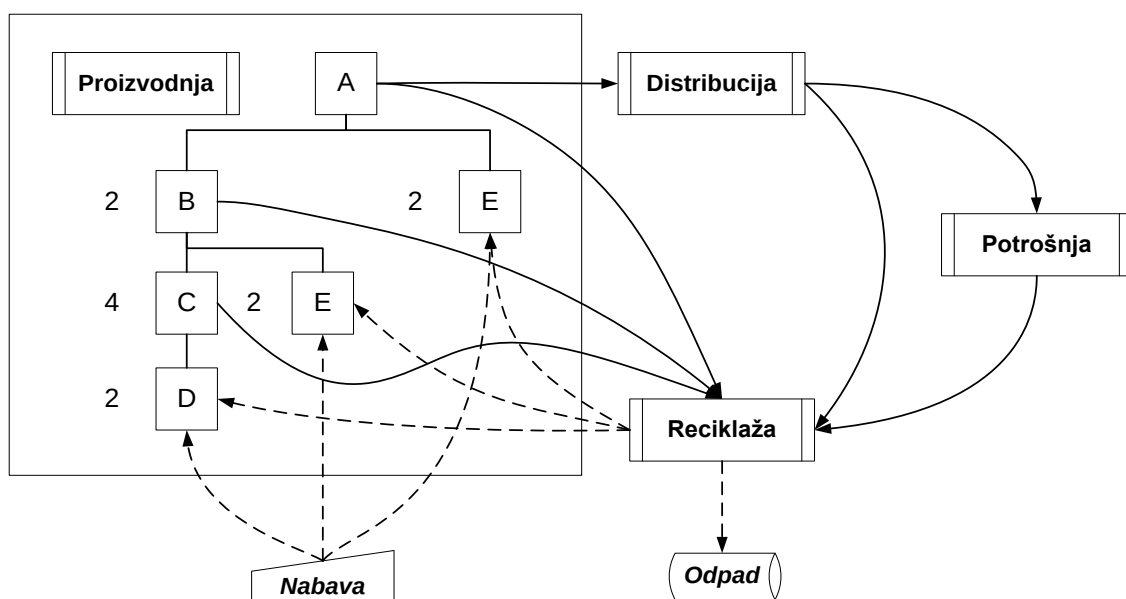
Komponente l so sestavljene znotraj proizvodnega podsistema in nato razstavljene oziroma reciklirane znotraj reciklažnega podsistema, zato je njihova neto proizvodnja znotraj vektorja $\mathbf{z}_1$ enaka 0. Vhodni elementi z najnižjega nivoja se reciklirajo, zato so znotraj vektorja $\mathbf{z}_1$ predstavljeni z neničelnimi vrednostmi.

Ker predpostavljamo zaprt sistem, v katerem ne prihaja do izgub, se Q_i^{14} in Q_i^{44} , ki opisujeta reciklirane in odpadne količine elementov, razlikujeta zgolj v predznaku. Znotraj vektorja $\mathbf{z}_1$ parcialne neto proizvodnje Q_i^{14} povejo, koliko odpadnih elementov m moramo nadomestiti z nakupom novih, da bo mogoča realizacija naslednjega proizvodnega cikla. Parcialne neto proizvodnje Q_i^{44} pa povejo, koliko elementov m izstopi iz sistema v obliki odpada. Gre za nereciklirane elemente, ki končajo na deponiji. Vektorja $\mathbf{z}_2$ in $\mathbf{z}_3$ vsebujeta samo ničelne vrednosti, kar pomeni, da se končni proizvodi ne zadržujejo znotraj distribucijskega in potrošnega podsistema daljše časovno obdobje. Končni proizvodi kontinuirano nadaljujejo svojo pot, ki se znotraj posamičnega cikla vedno zaključi v reciklažnem podsistemu.

3.1.4 Prikaz modela na numeričnem primeru

Strukturo vhodne in izhodne matrike ter pomen rezultatov lahko prikažemo na enostavnem numeričnem primeru, ki je v shematični obliki razviden s Slike 11. Struktura končnega proizvoda A je prikazana s kosovnico, razvidni pa so tudi vsi fizično dovoljeni materialni tokovi znotraj sistema.

Slika 11: Prikaz vseh tokov znotraj podsistemov in med njimi za obravnavani numerični primer



Iz kosovnice lahko razberemo, da je končni proizvod A sestavljen iz 2 enot komponente B in 2 enot surovine E. Komponenta B je sestavljena iz 4 enot komponente C in 2 enot surovine E. Komponenta C je sestavljena iz 2 enot surovine D. Končni proizvod A vedno konča svoj življenjski cikel v reciklažnem podsistemu, v katerega lahko preide iz proizvodnje, distribucije ali končne potrošnje. Komponenti B in C se uporabita znotraj montažnega procesa proizvodnega podsistema, lahko pa preideta neposredno v reciklažni podsistem (zaradi neustrezne kvalitete, odvečne proizvodnje, poškodb ali zastarelosti).

Surovini D in E sta primarna elementa sistema in posledično ležita na najnižjem nivoju kosovnice. Elementov D in E torej ni mogoče nadalje razstaviti. Z reciklažo se pridobivata ravno v obratni smeri sestavljanja, torej iz komponent B in C ter iz končnega proizvoda A. Reciklaža surovin D in E iz končnega proizvoda A poteka po treh različnih poteh:

- 1) iz A, ki vstopa v reciklažni podsistem neposredno iz proizvodnje,
- 2) iz A, ki vstopa v reciklažni podsistem preko distribucije, in
- 3) iz A, ki vstopa v reciklažni podsistem preko distribucije in potrošnje.

Predpostavimo, da pri vsakem od opazovanih tokov sistema 20 % celotne količine elementov preide neposredno v reciklažni podsistem, ostalih 80 % pa preide na višji nivo sistema (znotraj posamičnega podsistema oziroma med dvema zaporednima podsistemoma).

Predpostavimo, da znotraj posamičnega cikla proizvedemo 1.000 enot končnega proizvoda A. Od tega 800 enot (80 % od 1.000) nadaljuje svojo pot v distribucijski podsistem, preostalih 200 enot (20 % od 1.000) pa preide neposredno v reciklažni podsistem. To posledično pomeni, da moramo za izpolnitev plana končne proizvodnje in pokritje vseh tokov sistema sestaviti 2.500 enot komponente B ($Q_{l=B} = Q_{l=A} * h_{31}^{11} \div (\beta_{11})_{l=B} = 1.000 * 2 \div 0,8$) in 12.500 enot komponente C ($Q_{l=C} = Q_{l=B} * h_{52}^{11} \div (\beta_{11})_{l=C} = 2.500 * 4 \div 0,8$). Izmed vseh 2.500 enot komponente B, ki jih potrebujemo za izvedbo posamičnega proizvodnega cikla, jih 2.000 preide v nadaljnji proizvodni proces (80 % od 2.500), 500 pa jih preide neposredno v reciklažni podsistem (20 % od 2.500). Podobno velja za komponento C, pri kateri se izmed vseh 12.500 enot, ki jih zahteva posamični cikel, 10.000 enot uporabi za proizvodnjo na višjem nivoju (80 % od 12.500), preostalih 2.500 (20 % od 12.500) pa jih preide neposredno v reciklažo. Znotraj distribucijskega podsistema končni proizvod distribuiramo na dve ločeni lokaciji: 75 % končne proizvodnje A se distribuira na lokacijo 1, preostalih 25 % pa na lokacijo 2.

V skladu z zgornjim opisom določimo koeficiente β_{nj} , ki opisujejo tokove v reciklažni podsistem: $\beta_{34} = 1$ in $\beta_{n'4} = 0,2$ (za vsako izstopno točko n'). Za obravnavani numerični primer so vsi preostali tokovi sistema z nižjega na višji nivo $\beta_{ij} = 0,8$. Koeficienta, ki opisujeta distribucijska tokova končnega proizvoda A na lokaciji 1 in 2, sta $\mu_1 = 0,75$ in $\mu_2 = 0,25$.

V Tabelah 1 in 2 prikazujemo vmesne reciklažne koeficiente α_i za obravnavani numerični primer, ki nam povejo stopnjo uspešno razstavljenih komponent v primeru razstavljanja do

najnižje stopnje (surovini D in E). Koeficienti α_i so torej vsi vmesni reciklažni koeficienti, ki se pojavijo pri razstavljanju posamičnega elementa na element nižjega nivoja. V primeru razstavljanja končnega proizvoda A je treba reciklažne koeficiente ločevati tudi glede na izstopni podsistem: proizvodnja (1), distribucija (2) ali potrošnja (3).

Tabela 1: Vmesni reciklažni koeficienti α_i za element (surovino) D

Reciklažno zaporedje		Proizvodnja (1)	Distribucija (2)	Potrošnja (3)
Komponenta C	D, C	0,5		
Komponenta B	D, C, B	0,4		
Komponenta B	C, B	0,5		
Proizvod A	D, C, B, A	0,2	0,2	0,1
Proizvod A	C, B, A	0,4	0,3	0,2
Proizvod A	B, A	0,5	0,4	0,3

S prvo vrstico v Tabeli 1 opisujemo situacijo, v kateri recikliramo element (surovino) D iz elementa (komponente) C, ki se ni uporabil v nadaljnjih procesih sestavljanja, temveč je izstopil neposredno v reciklažni podsistem. Vrednost 0,5 predstavlja delež uspešno recikliranih elementov: uspešno se reciklira 50 % elementov D, preostalih 50 % pa predstavlja odpad, ki ga odstranimo na deponijo. V drugi vrstici na podoben način predstavljamo situacijo, v kateri uspešno recikliramo 40 % elementa (surovine) D iz elementa (komponente) C, ki je vstopil v reciklažni podsistem kot sestavni del elementa (komponente) B. Element (komponenta) B v tem primeru ne nastopi kot gradnik končnega proizvoda A, saj ga predhodno izločimo iz proizvodnega podsistema neposredno v reciklažo. Tretja vrstica predstavlja reciklažni koeficient za element (komponento) C, ki ga pridobimo iz elementa (komponente) B, ki je prav tako zapustil proizvodni podsistem in končal neposredno v reciklažnem podsistemu. Vrstice od 4 do 6 se nanašajo na razstavljanje elementa (končnega proizvoda) A, zato reciklažne koeficiente dodatno razširimo še na podsistema distribucije in potrošnje, ki sta tako kot proizvodni podsistem izvora materialnega toka končnega proizvoda v reciklažo. Na podoben način, kot opisujemo zgoraj, lahko interpretiramo tudi vse druge vmesne reciklažne koeficiente, ki jih zapisujemo v Tabelah 1 in 2.

Tabela 2: Vmesni reciklažni koeficienti α_i za element (surovino) E

Reciklažno zaporedje		Proizvodnja (1)	Distribucija (2)	Potrošnja (3)
Komponenta B	E, B	0,5		
Proizvod A	E, A	0,7	0,6	0,5
Proizvod A	E, B, A	0,4	0,35	0,3
Proizvod A	B, A	0,5	0,4	0,3

Na podlagi vmesnih koeficientov α_i lahko v skladu z enačbo (91) izračunamo končne reciklažne koeficiente, ki jih potrebujemo za definiranje izhodne matrike **G**. Ker v skladu s

kosovnico element (surovino) D vedno recikliramo iz elementa (komponente) C, element (surovino) E pa lahko pridobimo tako iz elementa (komponente) B kot tudi elementa (končnega proizvoda) A, vsebuje izhodna matrika **G** tri končne reciklažne koeficiente: $\alpha_{k4l3} = 0,1420$, $\alpha_{k5l2} = 0,5560$ in $\alpha_{k5l1} = 0,1960$. Podrobne izračune končnih stopenj reciklaže za vse realno mogoče tokove prikazujemo v Tabeli 3. Prazna polja v Tabeli 3 pomenijo, da tam materialni tok ni fizično mogoč; npr. elementa (surovine) E ne moremo nikdar reciklirati iz elementa (komponente) C, saj v skladu s kosovnico ni njegov gradnik.

Tabela 3: Izračun končnih stopenj reciklaže α_{k4l3} , α_{k5l2} in α_{k5l1}

n'	$l3$	$l2$	$l1$	2	3	Vsota
α_{k4l3}	$0,2*0,5$	$0,8*0,2*$ $*0,5*0,4$	$0,8^2*0,2*$ $*0,5*0,4*0,2$	$0,8^3*0,2*$ $*0,4*0,3*0,2$	$0,8^4*0,3*$ $*0,2*0,1$	0,1420
α_{k5l2}		$0,2*0,5$	$0,8*0,2*0,5*0,4$	$0,8^2*0,2*$ $*0,4*0,35$	$0,8^3*0,3*0,3$	0,1960
α_{k5l1}			$0,2*0,7$	$0,8*0,2*0,6$	$0,8^2*0,5$	0,5560

V skladu s splošno definicijo zapišemo vhodno matriko **H** in vektor gostote tokov **P** za obravnavani numerični primer v naslednji obliki:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} & & 0,8 & & & & \\ & 2 & & & & & \\ & & 4 & & & & \\ & & & 2 & & & \\ 2 & 2 & & & & & \\ \hline & & & 0,8*0,8*0,75 & & & \\ & & & 0,8*0,8*0,25 & & & \\ & & & & 0,8*0,2 & & \\ & & & & 0,8*0,8 & & \\ \hline \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1.000 \\ 2.500 \\ 12.500 \\ \hline 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \\ 2.500 \\ 12.500 \end{bmatrix} \quad (93)$$

Izhodna matrika **G** vsebuje vse izhodne koeficiente sistema, vključno s predhodno izračunanimi končnimi reciklažnimi koeficienti v podmatrikah $\mathbf{G}_{14}$ in $\mathbf{G}_{44}$:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix}
 0,8 & & & & & & & & \\
 0,2 & & & & & & & & \\
 & 0,8 & & & & & & & \\
 & 0,2 & & & & & & & \\
 & & 0,8 & & & & & & \\
 & & 0,2 & & & & & & \\
 & & & & 2*0,556 & 2*0,196 & 2*0,142 & & \\
 & & & & & & & & \\
 & & 0,8*0,8*0,75 & & & & & & \\
 & & 0,8*0,8*0,25 & & & & & & \\
 & & 0,8*0,2 & & & & & & \\
 & & & & 0,8*0,8 & & & & \\
 & & & & & & 2*(1-0,142) & & \\
 & & & & 2*(1-0,556) & 2*(1-0,196) & & &
 \end{bmatrix} \quad (94)$$

S pomočjo vhodne matrike $\mathbf{H}$ in izhodne matrike $\mathbf{G}$ ter vektorja gostote tokov $\mathbf{P}$ lahko v naslednjem koraku predstavimo vhodne zahteve $\mathbf{x} = \mathbf{HP}$, izhode sistema $\mathbf{y} = \mathbf{GP}$ in izračunamo neto proizvodnjo sistema $\mathbf{z} = \mathbf{y} - \mathbf{x} = (\mathbf{G} - \mathbf{H})\mathbf{P}$:

$$\mathbf{x} = \mathbf{HP} = \begin{bmatrix} 800 \\ 200 \\ 2.000 \\ 500 \\ 10.000 \\ 2.500 \\ 25.000 \\ 7.000 \\ 480 \\ 160 \\ 160 \\ 640 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = \mathbf{GP} = \begin{bmatrix} 800 \\ 200 \\ 2.000 \\ 500 \\ 10.000 \\ 2.500 \\ 3.551 \\ 2.092 \\ 480 \\ 160 \\ 160 \\ 640 \\ 21.449 \\ 4.908 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{z} = \mathbf{y} - \mathbf{x} = (\mathbf{G} - \mathbf{H})\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -21.449 \\ -4.908 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 21.449 \\ 4.908 \end{bmatrix} \quad (95)$$

Izmed vseh 1.000 enot končnega proizvoda A znotraj posamičnega cikla jih 800 preide iz proizvodnega v distribucijski podsistem, 200 pa neposredno v reciklažni podsistem. Izmed 800 enot A znotraj distribucijskega podsistema jih 480 dostavimo na lokacijo 1, 160 na lokacijo 2, preostalih 160 pa vstopi neposredno v reciklažni podsistem. To pomeni, da v

potrošni podsistem vstopi 640 enot končnega proizvoda, ki pa na koncu svojega življenjskega cikla prav tako končajo v reciklažnem podsistemu.

Znotraj enega cikla potrebujemo skupno 2.500 enot komponente B, izmed katerih jih 2.000 porabimo za izdelavo končnega proizvoda, preostalih 500 pa je izmet iz proizvodnje, ki preide neposredno v reciklažni podsistem. Podobno uporabimo 10.000 enot komponente C za izgradnjo komponente B, preostalih 2.500 enot pa preide neposredno v reciklažo.

Za zagon novega proizvodnega cikla potrebujemo 25.000 enot elementa (surovine) D. Znotraj posamičnega cikla uporabimo 3.551 enot elementa D, pridobljenih s postopkom reciklaže v predhodnem ciklu, preostalih 21.449 enot pa nadomestimo z nabavnimi aktivnostmi na trgu surovin. Podobno potrebujemo za izvedbo cikla 7.000 enot elementa E, izmed katerih vstopi 2.092 enot v proizvodni podsistem iz reciklažnega podsistema, preostalih 4.908 enot pa moramo nadomestiti z nabavnimi aktivnostmi na trgu surovin.

Iz neto proizvodnje **z** lahko razberemo, da je končni rezultat posamičnega cikla 21.449 odpadnih enot elementa D in 4.908 odpadnih enot elementa E; vse enote končajo na deponijah. Kot prikazujemo v nadaljevanju raziskovalnega dela, je mogoče s tehnološkimi dejavniki in ustrezno zakonodajo (okoljske dajatve) vplivati na stopnje reciklaže, s čimer lahko znižamo delež odpadnih elementov in povečamo njihovo ponovno uporabo.

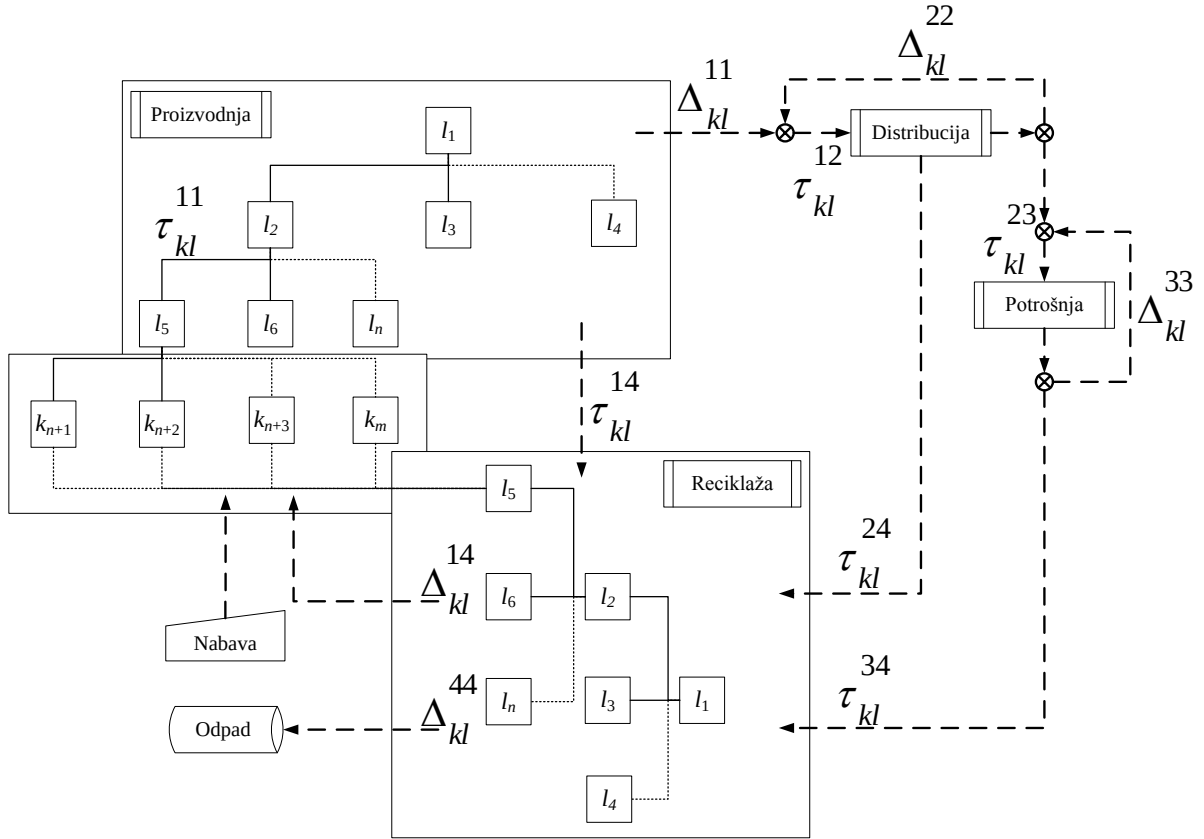
3.1.5 Vključitev časovnih zakasnitev in izračun neto sedanje vrednosti

Aktivnosti znotraj katerekoli celice aktivnosti povzročajo časovne zakasnitve, ki zaradi časovne vrednosti denarja vplivajo na neto sedanjo vrednost sistema kot celote. Sliko 10 lahko nadgradimo s prikazom vseh potencialnih časovnih zakasnitev vhodnih procesov τ_{kl}^{ij} in izhodnih procesov Δ_{kl}^{ij} , kar predstavljamo na Sliki 12. Časovne zakasnitve so lahko posledica proizvodnih, distribucijskih, potrošnih ali reciklažnih aktivnosti, ki jih vključimo v vhodno in izhodno matriko, s čimer dobimo t. i. generalizirano vhodno matriko $\tilde{\mathbf{H}}(s)$ in generalizirano izhodno matriko $\tilde{\mathbf{G}}(s)$.

Na podlagi splošnega zapisa vhodne matrike v poglavju 3.1.1 lahko zapišemo generalizirano vhodno matriko razširjene teorije planiranja materialnih potreb $\tilde{\mathbf{H}}(s)$, ki poleg tehničnih koeficientov vsebuje tudi časovne zakasnitve:

$$\tilde{\mathbf{H}}(s) = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{H}}_{11}(s) & \tilde{\mathbf{H}}_{12}(s) & 0 & \tilde{\mathbf{H}}_{14}(s) \\ 0 & 0 & \tilde{\mathbf{H}}_{23}(s) & \tilde{\mathbf{H}}_{24}(s) \\ 0 & 0 & 0 & \tilde{\mathbf{H}}_{34}(s) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (96)$$

Slika 12: Vključitev časovnih zakasnitev v model razširjene teorije planiranja materialnih potreb z vključenimi vsemi vhodi v reciklažni podsistem



Generalizirana vhodna matrika $\tilde{\mathbf{H}}(s)$ sestoji iz več podmatrik $\tilde{\mathbf{H}}_{ij}(s)$, pri čemer vsaka od podmatrik $\tilde{\mathbf{H}}_{ij}(s)$ opisuje zahteve po elementih podsistema i zaradi procesov, ki se izvajajo v podsistemu j . Te zahteve so sestavljene iz tehničnih koeficientov in časovnih zakasnitev.

Ker se podmatrika $\tilde{\mathbf{H}}_{11}(s)$ nanaša na proizvodni podsistem, moramo za vsako pojavno celico aktivnosti podsistema upoštevati proizvodne časovne zakasnitve, ki so zbrane v podmatriki $\tilde{\tau}_{11}^{pr}(s)$. Proizvodne časovne zakasnitve so posledica montažnih aktivnosti znotraj posamičnih celic aktivnosti: to je čas, potreben za izgradnjo posamične komponente na nekem nivoju kosovnice, pri čemer uporabimo sestavne elemente, ki so natanko en nivo nižje. Sestavni elementi morajo biti na razpolago na začetku montažnega procesa znotraj celice aktivnosti, zato bodo njihove proizvodne časovne zakasnitve znotraj iste celice aktivnosti (nivoja sestavljanja znotraj kosovnice) vedno identične. To pa ne velja nujno tudi za vse transportne časovne zakasnitve sestavnih elementov; te so lahko edinstvene za vsak posamični element, ki ga transportiramo od celice aktivnosti k do celice aktivnosti l . Ta predpostavka je realna, saj lahko različni gradniki neke komponente izhajajo iz prostorsko dislociranih celic aktivnosti, zato so njihove transportne časovne zakasnitve različne. Transportne časovne zakasnitve med poljubnima celicama aktivnosti k in l moramo zato obravnavati individualno. Vključimo jih

neposredno v splošni zapis podmatrice $\tilde{\mathbf{H}}_{11}^{tr}(s)$, in sicer na tistem nivoju (celice aktivnosti), na katerem do njih dejansko prihaja. Razširjeno generalizirano podmatrisko $\check{\mathbf{H}}_{11}(s)$, ki vključuje tako proizvodne kot transportne časovne zakasnitve znotraj proizvodnega podsistema, v splošni obliki zapišemo kot:

$$\check{\mathbf{H}}_{11}(s) = \tilde{\mathbf{H}}_{11}^{tr}(s) \tilde{\mathbf{\tau}}_{11}^{pr}(s) = \quad (97)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ h_{31}^{11} e^{s(\tau_{31}^{11})^{tr}} & 0 & h_{33}^{11} e^{s(\tau_{33}^{11})^{tr}} & \dots & h_{3n}^{11} e^{s(\tau_{3n}^{11})^{tr}} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ h_{51}^{11} e^{s(\tau_{51}^{11})^{tr}} & h_{52}^{11} e^{s(\tau_{52}^{11})^{tr}} & 0 & \dots & h_{5n}^{11} e^{s(\tau_{5n}^{11})^{tr}} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{(2n-1)1}^{11} e^{s(\tau_{(2n-1)1}^{11})^{tr}} & h_{(2n-1)2}^{11} e^{s(\tau_{(2n-1)2}^{11})^{tr}} & h_{(2n-1)3}^{11} e^{s(\tau_{(2n-1)3}^{11})^{tr}} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ h_{(2n+1)1}^{11} e^{s(\tau_{(2n+1)1}^{11})^{tr}} & h_{(2n+1)2}^{11} e^{s(\tau_{(2n+1)2}^{11})^{tr}} & h_{(2n+1)3}^{11} e^{s(\tau_{(2n+1)3}^{11})^{tr}} & \dots & h_{(2n+1)n}^{11} e^{s(\tau_{(2n+1)n}^{11})^{tr}} \\ h_{(2n+2)1}^{11} e^{s(\tau_{(2n+2)1}^{11})^{tr}} & h_{(2n+2)2}^{11} e^{s(\tau_{(2n+2)2}^{11})^{tr}} & h_{(2n+2)3}^{11} e^{s(\tau_{(2n+2)3}^{11})^{tr}} & \dots & h_{(2n+2)n}^{11} e^{s(\tau_{(2n+2)n}^{11})^{tr}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m1}^{11} e^{s(\tau_{m1}^{11})^{tr}} & h_{m2}^{11} e^{s(\tau_{m2}^{11})^{tr}} & h_{m3}^{11} e^{s(\tau_{m3}^{11})^{tr}} & \dots & h_{mn}^{11} e^{s(\tau_{mn}^{11})^{tr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{s(\tau_1^{11})^{pr}} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & e^{s(\tau_n^{11})^{pr}} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ h_{31}^{11} e^{s(\tau_{31}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_1^{11})^{pr}} & 0 & h_{33}^{11} e^{s(\tau_{33}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_3^{11})^{pr}} & \dots & h_{3n}^{11} e^{s(\tau_{3n}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_n^{11})^{pr}} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ h_{51}^{11} e^{s(\tau_{51}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_1^{11})^{pr}} & h_{52}^{11} e^{s(\tau_{52}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_2^{11})^{pr}} & 0 & \dots & h_{5n}^{11} e^{s(\tau_{5n}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_n^{11})^{pr}} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{(2n-1)1}^{11} e^{s(\tau_{(2n-1)1}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_1^{11})^{pr}} & h_{(2n-1)2}^{11} e^{s(\tau_{(2n-1)2}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_2^{11})^{pr}} & h_{(2n-1)3}^{11} e^{s(\tau_{(2n-1)3}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_3^{11})^{pr}} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ h_{(2n+1)1}^{11} e^{s(\tau_{(2n+1)1}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_1^{11})^{pr}} & h_{(2n+1)2}^{11} e^{s(\tau_{(2n+1)2}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_2^{11})^{pr}} & h_{(2n+1)3}^{11} e^{s(\tau_{(2n+1)3}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_3^{11})^{pr}} & \dots & h_{(2n+1)n}^{11} e^{s(\tau_{(2n+1)n}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_n^{11})^{pr}} \\ h_{(2n+2)1}^{11} e^{s(\tau_{(2n+2)1}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_1^{11})^{pr}} & h_{(2n+2)2}^{11} e^{s(\tau_{(2n+2)2}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_2^{11})^{pr}} & h_{(2n+2)3}^{11} e^{s(\tau_{(2n+2)3}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_3^{11})^{pr}} & \dots & h_{(2n+2)n}^{11} e^{s(\tau_{(2n+2)n}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_n^{11})^{pr}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m1}^{11} e^{s(\tau_{m1}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_1^{11})^{pr}} & h_{m2}^{11} e^{s(\tau_{m2}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_2^{11})^{pr}} & h_{m3}^{11} e^{s(\tau_{m3}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_3^{11})^{pr}} & \dots & h_{mn}^{11} e^{s(\tau_{mn}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_n^{11})^{pr}} \end{bmatrix}$$

Končni proizvod preide iz proizvodnega podsistema bodisi v distribucijski podsistem bodisi neposredno v reciklažni podsistem. Posamične komponente znotraj proizvodnega podsistema lahko uporabimo kot gradnike na naslednji stopnji montažnega procesa ali pa preidejo neposredno v reciklažni podsistem. Te prehode, ki vsebujejo tudi časovne zakasnitve, vključimo v podmatrikah $\check{\mathbf{H}}_{12}(s)$ in $\check{\mathbf{H}}_{14}(s)$. Pri teh tokovih so prisotne izključno transportne časovne zakasnitve, ki so lastne vsakemu prehodu med zaporednim parom celic aktivnosti k in l . Tok končnih proizvodov ter iz proizvodnega podsistema izločenih komponent prehaja izključno med različnimi celicami aktivnosti, v katerih montažnih aktivnosti ne izvajamo več, zato tu ne vključujemo proizvodnih časovnih zakasnitev. Generalizirani vhodni podmatriki $\check{\mathbf{H}}_{12}(s)$ in $\check{\mathbf{H}}_{14}(s)$ zato v splošni obliki, ki vključuje individualne transportne časovne zakasnitve, zapišemo na naslednji način:

$$\check{\mathbf{H}}_{12}(s) = \begin{bmatrix} h_{11}^{12} e^{s\tau_{11}^{12}} \\ 0 \\ \hline 0 \\ 0 \\ \hline 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ \hline 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \check{\mathbf{H}}_{14}(s) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ h_{21}^{14} e^{s\tau_{21}^{14}} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & h_{42}^{14} e^{s\tau_{42}^{14}} & 0 & \cdots & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & h_{63}^{14} e^{s\tau_{63}^{14}} & \cdots & 0 \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & h_{(2n)}^{14} e^{s\tau_{(2n)}^{14}} \\ \hline 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (98)$$

Podobne predpostavke lahko uporabimo pri podmatrikah $\check{\mathbf{H}}_{23}(s)$, $\check{\mathbf{H}}_{24}(s)$ in $\check{\mathbf{H}}_{34}(s)$. Podmatrika $\check{\mathbf{H}}_{23}(s)$ vsebuje sorazmerne deleže kontingenta končnih proizvodov, ki jih distribuiramo na različne lokacije 1, 2, ..., r v skladu z zahtevami potrošnega podsistema. Podmatriki $\check{\mathbf{H}}_{24}(s)$ in $\check{\mathbf{H}}_{34}(s)$ predstavljata zahteve reciklažnega podsistema zaradi distribucijskih in potrošnih aktivnosti; to so deleži končnih proizvodov, ki preidejo iz distribucijskega in potrošnega podsistema v reciklažni podsistem. Potrošni podsistem lahko obravnavamo kot transformacijo novih proizvodov v izrabljene končne proizvode na koncu njihovega življenjskega cikla. Časovne zakasnitve zaradi potrošnje lahko obravnavamo na podoben način kot distribucijske (transportne) časovne zakasnitve. Te časovne zakasnitve so enake za vsako transformacijo med poljubnima celicama aktivnosti k in l , saj gre le za lokacijsko redistribucijo končnih proizvodov, njihova oblika pa se pri tem ne spreminja.

Generalizirani vhodni podmatriki $\check{\mathbf{H}}_{23}(s)$ in $\check{\mathbf{H}}_{24}(s)$ sta v splošni obliki zapisa zato:

$$\check{\mathbf{H}}_{23}(s) = \begin{bmatrix} h_{11}^{23} e^{s\tau_{r1}^{23}} \\ \vdots \\ h_{r1}^{23} e^{s\tau_{r1}^{23}} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \check{\mathbf{H}}_{24}(s) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ h_{(r+1)1}^{24} e^{s\tau_{(r+1)1}^{24}} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (99)$$

Generalizirano vhodno podmatriko $\check{\mathbf{H}}_{34}(s)$ lahko v splošnem zapišemo kot:

$$\check{\mathbf{H}}_{34}(s) = \begin{bmatrix} h_{11}^{34} e^{s\tau_{11}^{34}} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (100)$$

Na podoben način kot generalizirano vhodno matriko $\check{\mathbf{H}}_{ij}(s)$ zapišemo tudi generalizirano izhodno matriko $\check{\mathbf{G}}(s)$:

$$\check{\mathbf{G}}(s) = \begin{bmatrix} \check{\mathbf{G}}_{11}(s) & 0 & 0 & \check{\mathbf{G}}_{14}(s) \\ 0 & \check{\mathbf{G}}_{22}(s) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \check{\mathbf{G}}_{33}(s) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \check{\mathbf{G}}_{44}(s) \end{bmatrix} \quad (101)$$

Generalizirana podmatrika $\check{\mathbf{G}}_{ij}(s)$ opisuje izhode podsistema i zaradi zahtev procesov, ki se izvajajo v podsistemu j . Podobno kot generalizirane vhodne podmatrike $\check{\mathbf{H}}_{ij}(s)$ sestojijo tudi generalizirane izhodne podmatrike $\check{\mathbf{G}}_{ij}(s)$ tako iz tehničnih koeficientov g_{kl}^{ij} kot tudi vseh časovnih zakasnitev. Vsaka podmatrika $\check{\mathbf{G}}_{ij}(s)$ po dimenziji sovpada s podmatriko $\check{\mathbf{H}}_{ij}(s)$. Generalizirane izhodne podmatrike $\check{\mathbf{G}}_{11}(s)$, $\check{\mathbf{G}}_{22}(s)$ in $\check{\mathbf{G}}_{33}(s)$ vsebujejo izhodne koeficiente zaradi proizvodnih, distribucijskih in potrošnih aktivnosti. Pri teh aktivnostih se pojavljajo transportne časovne zakasnitve pri poljubni transformaciji iz celice aktivnosti k v celico aktivnosti l , ki jih označimo z Δ_{kl}^{11} , Δ_{kl}^{22} in Δ_{kl}^{33} . Generalizirane izhodne podmatrike $\check{\mathbf{G}}_{11}(s)$, $\check{\mathbf{G}}_{22}(s)$ in $\check{\mathbf{G}}_{33}(s)$ v splošni obliki zapišemo kot:

$$\tilde{\mathbf{G}}_{11}(s) = \begin{bmatrix} g_{11}^{11} e^{-s\Delta_{11}^{11}} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ g_{21}^{11} e^{-s\Delta_{21}^{11}} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \hline 0 & g_{32}^{11} e^{-s\Delta_{32}^{11}} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & g_{42}^{11} e^{-s\Delta_{42}^{11}} & 0 & \cdots & 0 \\ \hline 0 & 0 & g_{53}^{11} e^{-s\Delta_{53}^{11}} & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & g_{63}^{11} e^{-s\Delta_{63}^{11}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hline 0 & 0 & 0 & \cdots & g_{(2n-1)n}^{11} e^{-s\Delta_{(2n-1)n}^{11}} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & g_{(2n)n}^{11} e^{-s\Delta_{(2n)n}^{11}} \\ \hline 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (102)$$

$$\tilde{\mathbf{G}}_{22}(s) = \begin{bmatrix} g_{11}^{22} e^{-s\Delta_{11}^{22}} \\ \vdots \\ g_{r1}^{22} e^{-s\Delta_{r1}^{22}} \\ g_{(r+1)1}^{22} e^{-s\Delta_{(r+1)1}^{22}} \end{bmatrix} \quad (103)$$

$$\tilde{\mathbf{G}}_{33}(s) = \left[g_{11}^{33} e^{-s\Delta_{11}^{33}} \right] \quad (104)$$

Pri izvajanju reciklažnih aktivnosti, ki so zajete v generaliziranih podmatrikah $\tilde{\mathbf{G}}_{14}(s)$ in $\tilde{\mathbf{G}}_{44}(s)$, se poleg transportnih pojavljajo tudi proizvodne časovne zakasnitve. Te časovne zakasnitve so posledica razstavljanja komponent na njihove gradnike v skladu z obratno kosovnico ter pomenijo, da bodo reciklirane komponente na voljo v času $t + \Delta_k^{14}$, pri čemer je $k = 1, 2, \dots, m$ in t predstavlja začetni (inicialni) čas reciklaže komponente l . Podobno kot pri proizvodnem podsistemu, predstavljenem v generalizirani vhodni podmatriki $\tilde{\mathbf{H}}_{11}(s)$, se med posamičnima reciklažnima celicama aktivnosti k in l pojavljajo transportne časovne zakasnitve, ki se razlikujejo med poljubnima celicama aktivnosti k in l .

Ob zaključku reciklažnih aktivnosti cikla se obnovljeni elementi vrnejo nazaj v proizvodni podsistem, kjer služijo kot vhodni elementi naslednjega proizvodnega cikla. Nereciklirane elemente, ki predstavljajo izhode sistema $\tilde{\mathbf{F}}(s)$, odstranimo na deponijo in jih nadomestimo z nabavo novih. Globalne, regionalne in lokalne okoljske politike zahtevajo za te odpadne elemente plačilo okoljskih dajatev kot povračilo za povzročeno ekološko škodo. Kot prikazujemo v nadaljevanju tega podpoglavja, je za določanje optimalne stopnje reciklaže

bistvenega pomena razmerje med stroški transporta recikliranih elementov v nov proizvodni cikel in stroški transporta odpadnih elementov na deponijo, vključno z ekološkimi dajatvami.

Transportne časovne zakasnitve, do katerih prihaja pri transportu recikliranih elementov v proizvodni podsistem, so unikatne za vsako posamično celico aktivnosti g_{kl}^{14} in so vključene v podmatriko $\tilde{\mathbf{G}}_{14}^{tr}(s)$, proizvodne časovne zakasnitve zaradi reciklaže na določeni stopnji obratne kosovnice pa so zajete v $\tilde{\Delta}_{14}^{pr}(s)$. Splošni zapis generalizirane izhodne podmatrike $\tilde{\mathbf{G}}_{14}(s)$ je tako:

$$\tilde{\mathbf{G}}_{14}(s) = \tilde{\Delta}_{14}^{pr}(s) \tilde{\mathbf{G}}_{14}^{tr}(s) = \quad (105)$$

$$= \begin{bmatrix} e^{-s(\Delta_1^{14})^{pr}} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & e^{-s(\Delta_m^{14})^{pr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \hline g_{(2n+1)1}^{14} e^{-s(\Delta_{(2n+1)1}^{14})^{tr}} & g_{(2n+1)2}^{14} e^{-s(\Delta_{(2n+1)2}^{14})^{tr}} & \dots & g_{(2n+1)n}^{14} e^{-s(\Delta_{(2n+1)n}^{14})^{tr}} \\ g_{(2n+2)1}^{14} e^{-s(\Delta_{(2n+2)1}^{14})^{tr}} & g_{(2n+2)2}^{14} e^{-s(\Delta_{(2n+2)2}^{14})^{tr}} & \dots & g_{(2n+2)n}^{14} e^{-s(\Delta_{(2n+2)n}^{14})^{tr}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{m1}^{14} e^{-s(\Delta_{m1}^{14})^{tr}} & g_{m2}^{14} e^{-s(\Delta_{m2}^{14})^{tr}} & \dots & g_{mn}^{14} e^{-s(\Delta_{mn}^{14})^{tr}} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \hline e^{-s(\Delta_{2n+1}^{14})^{pr}} g_{(2n+1)1}^{14} e^{-s(\Delta_{(2n+1)1}^{14})^{tr}} & e^{-s(\Delta_{2n+1}^{14})^{pr}} g_{(2n+1)2}^{14} e^{-s(\Delta_{(2n+1)2}^{14})^{tr}} & \dots & e^{-s(\Delta_{2n+1}^{14})^{pr}} g_{(2n+1)n}^{14} e^{-s(\Delta_{(2n+1)n}^{14})^{tr}} \\ e^{-s(\Delta_{2n+2}^{14})^{pr}} g_{(2n+2)1}^{14} e^{-s(\Delta_{(2n+2)1}^{14})^{tr}} & e^{-s(\Delta_{2n+2}^{14})^{pr}} g_{(2n+2)2}^{14} e^{-s(\Delta_{(2n+2)2}^{14})^{tr}} & \dots & e^{-s(\Delta_{2n+2}^{14})^{pr}} g_{(2n+2)n}^{14} e^{-s(\Delta_{(2n+2)n}^{14})^{tr}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-s(\Delta_m^{14})^{pr}} g_{m1}^{14} e^{-s(\Delta_{m1}^{14})^{tr}} & e^{-s(\Delta_m^{14})^{pr}} g_{m2}^{14} e^{-s(\Delta_{m2}^{14})^{tr}} & \dots & e^{-s(\Delta_m^{14})^{pr}} g_{mn}^{14} e^{-s(\Delta_{mn}^{14})^{tr}} \end{bmatrix}$$

Na podoben način kot generalizirano izhodno podmatriko $\tilde{\mathbf{G}}_{14}(s)$, ki opisuje lastnosti recikliranih elementov, lahko zapišemo tudi generalizirano izhodno podmatriko $\tilde{\mathbf{G}}_{44}(s)$, ki opisuje lastnosti odpadnih elementov, ki jih odstranimo na deponijo. Podmatrika $\tilde{\mathbf{G}}_{44}(s)$ vsebuje proizvodne časovne zakasnitve, ki nastanejo zaradi reciklažnih aktivnosti, in transportne časovne zakasnitve, do katerih prihaja zaradi distribucije odpadkov na deponijo:

$$\tilde{\mathbf{G}}_{44}(s) = \tilde{\Delta}_{44}^{pr}(s) \tilde{\mathbf{G}}_{44}^{tr}(s) = \quad (106)$$

$$\begin{aligned}
&= \begin{bmatrix} e^{-s(\Delta_1^{44})^{pr}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & e^{-s(\Delta_{m-2n}^{44})^{pr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_{11}^{44} e^{-s(\Delta_{11}^{44})^{tr}} & g_{12}^{44} e^{-s(\Delta_{12}^{44})^{tr}} & \cdots & g_{1n}^{44} e^{-s(\Delta_{1n}^{44})^{tr}} \\ g_{21}^{44} e^{-s(\Delta_{21}^{44})^{tr}} & g_{22}^{44} e^{-s(\Delta_{22}^{44})^{tr}} & \cdots & g_{2n}^{44} e^{-s(\Delta_{2n}^{44})^{tr}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{(m-2n)1}^{44} e^{-s(\Delta_{(m-2n)1}^{44})^{tr}} & g_{(m-2n)2}^{44} e^{-s(\Delta_{(m-2n)2}^{44})^{tr}} & \cdots & g_{(m-2n)n}^{44} e^{-s(\Delta_{(m-2n)n}^{44})^{tr}} \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} e^{-s(\Delta_1^{44})^{pr}} g_{11}^{44} e^{-s(\Delta_{11}^{44})^{tr}} & e^{-s(\Delta_1^{44})^{pr}} g_{12}^{44} e^{-s(\Delta_{12}^{44})^{tr}} & \cdots & e^{-s(\Delta_1^{44})^{pr}} g_{1n}^{44} e^{-s(\Delta_{1n}^{44})^{tr}} \\ e^{-s(\Delta_2^{44})^{pr}} g_{21}^{44} e^{-s(\Delta_{21}^{44})^{tr}} & e^{-s(\Delta_2^{44})^{pr}} g_{22}^{44} e^{-s(\Delta_{22}^{44})^{tr}} & \cdots & e^{-s(\Delta_2^{44})^{pr}} g_{2n}^{44} e^{-s(\Delta_{2n}^{44})^{tr}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-s(\Delta_{(m-2n)}^{44})^{pr}} g_{(m-2n)1}^{44} e^{-s(\Delta_{(m-2n)1}^{44})^{tr}} & e^{-s(\Delta_{(m-2n)}^{44})^{pr}} g_{(m-2n)2}^{44} e^{-s(\Delta_{(m-2n)2}^{44})^{tr}} & \cdots & e^{-s(\Delta_{(m-2n)}^{44})^{pr}} g_{(m-2n)n}^{44} e^{-s(\Delta_{(m-2n)n}^{44})^{tr}} \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Na podlagi strukture generaliziranih podmatrik $\tilde{\mathbf{G}}_{14}(s)$ in $\tilde{\mathbf{G}}_{44}(s)$ lahko predpostavimo, da igra lokacija reciklažnih obratov pomembno vlogo pri iskanju ravnotežja sistema. Kadar reciklažni obrat postavimo bližje proizvodnemu obratu, skrajšamo časovne zakasnitve Δ_{ij}^{14} , to pa vpliva tudi na znižanje distribucijskih stroškov $\tilde{\Pi}_G^{14}(s)$ in posledično na zvišanje neto sedanje vrednosti sistema kot celote. V takšnih primerih lahko pričakujemo višje optimalne reciklažne stopnje, saj je strošek distribucije zaradi ponovne uporabe recikliranega elementa nižji od okoljskih dajatev in stroška odstranitve odpadnega elementa na deponijo. Po drugi strani pa bližina odlagališč in enostavnost odlaganja povzročata nizke transportne časovne zakasnitve in distribucijske stroške odpadkov, ki so vključeni v podmatriko $\tilde{\Pi}_G^{44}(s)$, s čimer se zmanjša ekonomičnost recikliranja. Ekonomsko smotrnost reciklaže lahko povečamo z vpeljavo oziroma zvišanjem okoljskih dajatev, ki imajo negativen vpliv na skupno neto sedanjo vrednost sistema, zato posledično stimulirajo povečanje reciklažnih aktivnosti oziroma stopenj reciklaže. S pomočjo razširjenega modela teorije planiranja materialnih potreb, predstavljenega v tem podpoglavju, lahko podrobno proučujemo takšne vplive in poiščemo ustrezno ekonomsko-okoljsko ravnotežje.

Pri iskanju ustreznega ravnotežja in optimalnih lokacij reciklažnih obratov moramo upoštevati tudi razdaljo od celic aktivnosti proizvodnega, distribucijskega in potrošnega podsistema do celic aktivnosti podsistema reciklaže. Te razdalje se odrazijo v časovnih zakasnitvah τ_{ij}^{14} , τ_{ij}^{24} , τ_{ij}^{34} in transportnih stroških, ki so zajeti v pripadajočih podmatrikah znotraj $\tilde{\Pi}_H(s)$. Prostorsko pozicioniranje reciklažnih obratov bližje proizvodnim aktivnostim bo skrajšalo časovne zakasnitve Δ_{ij}^{14} in znižalo distribucijske stroške $\tilde{\Pi}_G^{14}(s)$, po drugi strani pa lahko povzroči višje vhodne časovne zakasnitve τ_{ij}^{14} , τ_{ij}^{24} in τ_{ij}^{34} ter posledično poveča transportne stroške vhodnih elementov v reciklažni podsistem. Pri iskanju ravnotežja sistema kot celote je bistvenega pomena vpliv prostorske pozicije posamičnih celic aktivnosti, saj na tak način v

veliki meri vplivamo na neto sedanjo vrednost in posledično na ekonomičnost sistema kot celote.

Cenovni vektor $\mathbf{p}$ za obravnavani razširjeni model teorije planiranja materialnih potreb na nivoju štirih podsistemov, ki ga potrebujemo za finančno vrednotenje sistema preko izračuna neto sedanje vrednosti, v splošni obliki zapišemo na naslednji način:

$$\mathbf{p} = \left[p_1^1 \quad p_2^1 \quad \cdots \quad p_m^1 \mid p_1^2 \quad p_2^2 \quad \cdots \quad p_{(r+1)}^2 \mid p_1^3 \mid p_1^4 \quad p_2^4 \quad \cdots \quad p_{(m-2n)}^4 \right] \quad (107)$$

Vsak individualni cenovni parameter p_k^i se nanaša na aktivnost k znotraj podsistema i . Parameter p_k^1 za vrednosti $k = 1, 2, \dots, m$ predstavlja vrednosti surovin, komponent in končnega izdelka znotraj proizvodnega podsistema na nivoju celice aktivnosti k . Znotraj distribucijskega podsistema predstavlja parameter p_k^2 tržne cene končnega proizvoda, ki je distribuiran na lokacije $1, 2, \dots, r$, pri čemer velja $k = 1, 2, \dots, r$. Cenovna vrednost neposredno izločenih končnih proizvodov iz distribucijskega podsistema v reciklažni podsystem je zajeta v parametru p_k^2 , pri čemer velja $k = r+1$. p_1^3 pa predstavlja preostalo vrednost posamičnega končnega izdelka ob koncu njegove življenjske dobe. V večini primerov lahko pričakujemo, da se bodo v podsistemih proizvodnje in distribucije pojavljale izključno pozitivne vrednosti: $p_k^1, p_k^2 \geq 0$. V nasprotju s proizvodnjo in distribucijo pa je lahko vrednost izrabljenega izdelka p_1^3 ob izhodu iz potrošnega podsistema bodisi pozitivna bodisi negativna. Pozitivni parameter p_1^3 pomeni, da ima izrabljeni izdelek ob koncu svoje življenjske dobe še neko preostalo vrednost, ki bo stimulirala višje optimalne stopnje reciklaže (na primer povratna embalaža, za katero dobi končni potrošnik vrnjeno kavcijo). Po drugi strani bo negativna vrednost p_1^3 za končnega potrošnika pomenila, da mu izrabljen izdelek predstavlja dodatne stroške. Če želimo stimulirati reciklažne aktivnosti in ponovno uporabo, moramo te stroške uravnovežiti z okoljskimi dajatvami. Okoljske dajatve so zajete v parametru p_k^4 , ki lahko zavzame vrednosti $k = 1, 2, \dots, m-2n$. V nasprotju s predhodnimi predpostavkami lahko pri parametru p_k^4 v večini primerov pričakujemo negativne vrednosti, ki predstavljajo strošek odlaganja odpadnih elementov, kar negativno vpliva na neto sedanjo vrednost. Namen tovrstnih okoljskih dajatev je spodbujanje čim višjih stopenj reciklaže in obnovljivosti virov, kar je ključnega pomena za doseganje dolgoročnega ekonomsko-okoljskega ravnotežja.

3.1.6 Razširjeni numerični primer z vključitvijo časovnih zakasnitev in izračunom neto sedanje vrednosti celotnega sistema

Vključitev časovnih zakasnitev v razširjeni model planiranja materialnih potreb prikažemo z nadgradnjo numeričnega primera, uporabljenega v podpoglavju 3.1.4. Vpeljava časovnih

Časovne zakasnitve τ^{pr} zaradi proizvodnih aktivnosti se v proučevanem modelu pojavijo izključno v proizvodnem podsistemu. Za pripadajočo proizvodno podmatriko $\mathbf{H}_{11}$ definiramo vrednosti časovnih zakasnitev:

$$\tilde{\tau}_{11}^{pr}(\rho) = \begin{bmatrix} e^{\rho\tau_{11}^{11}} & 0 & 0 \\ 0 & e^{\rho\tau_{22}^{11}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{\rho\tau_{33}^{11}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{3\rho} & 0 & 0 \\ 0 & e^{2\rho} & 0 \\ 0 & 0 & e^{1\rho} \end{bmatrix} \quad (108)$$

$$\tilde{\mathbf{H}}(\rho) = \tilde{\mathbf{H}}^{tr}(\rho) \tilde{\mathbf{t}}^{pr}(\rho) = \quad (109)$$

Na tem mestu izpostavljamo dejstvo, da vsebuje generalizirana vhodna podmatrika $\check{\mathbf{H}}_{11}(\rho)$ hkrati transportne in proizvodne časovne zakasnitve, ki jih v matriki $\check{\mathbf{H}}(\rho)$ prikazujemo v obliki vsote $\tau^{tr} + \tau^{pr}$.

Na podoben način kot pri vhodni matriki diferenciramo časovne zakasnitve tudi pri izhodni matriki. Časovne zakasnitve zaradi proizvodnih (reciklažnih) aktivnosti Δ^{pr} se pojavijo v podmatrikah $\mathbf{G}_{14}$ in $\mathbf{G}_{44}$, pri čemer so v $\mathbf{G}_{14}$ zajeti deleži recikliranih elementov in v $\mathbf{G}_{44}$ deleži odpadnih elementov, ki svoj cikel zaključijo na deponiji. Za obravnavani numerični primer časovne zakasnitve zaradi proizvodnih (reciklažnih) aktivnosti zapišemo v $\tilde{\Delta}_{14}^{pr}(\rho)$ in $\tilde{\Delta}_{44}^{pr}(\rho)$:

$$\tilde{\Delta}_{14}^{pr}(\rho) = \begin{bmatrix} e^{-\rho\tau_{11}^{14}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\rho\tau_{22}^{14}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\rho\tau_{33}^{14}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-\rho\tau_{44}^{14}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-\rho\tau_{55}^{14}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-\rho\tau_{66}^{14}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-\rho\tau_{77}^{14}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-\rho\tau_{88}^{14}} \end{bmatrix} = \quad (110)$$

$$= \begin{bmatrix} e^{-0\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-0\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-0\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-0\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-0\rho} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-0\rho} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-5\rho} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-4\rho} \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\Delta}_{44}^{pr}(\rho) = \begin{bmatrix} e^{-\rho\tau_{11}^{44}} & 0 \\ 0 & e^{-\rho\tau_{22}^{44}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-4\rho} & 0 \\ 0 & e^{-3\rho} \end{bmatrix} \quad (111)$$

Končno generalizirano izhodno matriko $\check{\mathbf{G}}(\rho)$ z vključenimi vrednostmi za proizvodne in transportne časovne zakasnitve zapišemo kot:

$p_2^4 = -4$, ki imata praviloma vedno negativno vrednost in predstavljata strošek odstranitve elementov D in E na deponijo (npr. okoljske dajatve).

Inicializacija procesov v katerikoli celici aktivnosti povzroči vzpostavitevne stroške, ki jim za proučevani primer v vektorju $\hat{\mathbf{K}}$ dodelimo naslednje vrednosti:

$$\hat{\mathbf{K}} = [5.600 \quad 3.000 \quad 2.500 \mid 1.100 \mid 1.150 \mid 800 \quad 6.700 \quad 5.800] \quad (114)$$

Začetni (inicialni) časi t in dolžine posameznih ciklov T so predstavljeni v $\tilde{\mathbf{t}}(\rho)$ in $\tilde{\mathbf{T}}(\rho)$; njihove vrednosti so:

$$\tilde{\mathbf{t}}(\rho) = \begin{bmatrix} e^{-8\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-5\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-3\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-11\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-14\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-17\rho} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-20\rho} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-23\rho} & 0 \end{bmatrix} \quad (115)$$

$$\tilde{\mathbf{T}}(\rho) = \begin{bmatrix} (1-e^{-4\rho})^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (1-e^{-8\rho})^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (1-e^{-16\rho})^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1-e^{-8\rho})^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1-e^{-10\rho})^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1-e^{-4\rho})^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1-e^{-5\rho})^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1-e^{-16\rho})^{-1} & 0 \end{bmatrix} \quad (116)$$

Na podlagi parametrov izračunamo dane čase $\tilde{\mathbf{v}}(\rho)$ in proizvodni plan $\tilde{\mathbf{P}}(\rho)$:

$$\tilde{\mathbf{v}}(\rho) = \tilde{\mathbf{t}}(\rho)\tilde{\mathbf{T}}(\rho) = [6,956 \quad 4,034 \quad 2,397 \mid 3,369 \mid 2,535 \mid 5,310 \quad 3,940 \quad 1,316]^T \quad (117)$$

$$\tilde{\mathbf{P}}(\rho) = \tilde{\mathbf{t}}(\rho)\tilde{\mathbf{T}}(\rho)\hat{\mathbf{P}} = [6.956 \quad 10.085 \quad 29.968 \mid 3.369 \mid 2.535 \mid 5.310 \quad 9.850 \quad 16.447]^T \quad (118)$$

Opazujemo razširjeni model planiranja materialnih potreb, ki ga sestavljajo štirje podsistemi z več različnimi celicami aktivnosti, ki so prostorsko dislocirane, zato moramo pri izračunu

neto sedanje vrednosti upoštevati tudi transportne stroške b_{ij}^{kl} med lokacijama i in j znotraj podmatrike $\tilde{\Pi}_H^{kl}(\rho)$. Transportne stroške b_{ij} , ki se nanašajo na vhodno matriko $\mathbf{H}$, predstavljamo v matriki $\tilde{\Pi}_H(\rho)$. Končne vrednosti matrike $\tilde{\Pi}_H(\rho)$ izračunamo s pomočjo ustrezno ležečih koeficientov h_{ij}^{kl} in transportnih časovnih zakasnitev τ_{ij}^{kl} , ki jih na numeričnem primeru predhodno prikazujemo v matrikah $\mathbf{H}$ in $\tilde{\mathbf{H}}(\rho)$. Proizvodne časovne zakasnitve $\tilde{\tau}^{pr}(\rho)$ so prisotne izključno znotraj proizvodnega podsistema.

$$\tilde{\Pi}_H(\rho) = \begin{bmatrix} & & 10h_{11}^{12}\tau_{11}^{12} & & \\ & 4h_{31}^{11}\tau_{31}^{11} & & 12h_{21}^{14}\tau_{21}^{14} & \\ & & 5h_{52}^{11}\tau_{52}^{11} & & 7h_{42}^{14}\tau_{42}^{14} \\ & & & & 10h_{63}^{14}\tau_{63}^{14} \\ 3h_{81}^{11}\tau_{81}^{11} & 2h_{82}^{11}\tau_{82}^{11} & 1h_{73}^{11}\tau_{73}^{11} & & \\ & & & 0h_{11}^{23}\tau_{11}^{23} & \\ & & & 0h_{21}^{23}\tau_{21}^{23} & \\ & & & & 0h_{31}^{24}\tau_{31}^{24} \\ & & & & 0h_{11}^{34}\tau_{11}^{34} \end{bmatrix} \quad \tilde{\tau}^{pr}(\rho) = \quad (119)$$

$$= \begin{bmatrix} & & 16,000 & & \\ & 26,260 & & 12,000 & \\ & & 0,000 & & 4,200 \\ & & & & 8,000 \\ 6,565 & 12,742 & 10,305 & & \\ & & & 0,000 & \\ & & & 0,000 & \\ & & & & 0,000 \\ & & & & 0,000 \end{bmatrix}$$

Opazimo lahko, da so transportni stroški b_{ij}^{23} , b_{ij}^{24} in b_{ij}^{34} znotraj $\tilde{\Pi}_H(\rho)$ enaki 0. Ti transportni stroški pripadajo distribucijskemu in potrošnemu podsistemu, zato jih vključimo v izhodno matriko transportnih stroškov $\tilde{\Pi}_G(\rho)$, njene vrednosti so:

$$\tilde{\Pi}_G(\rho) = \quad (120)$$

[illegible]

Skupno neto sedanjo vrednost vseh štirih podsistemov izračunamo iz zgoraj podanih parametrov kot razliko med neto sedanjo vrednostjo prihodkov $\mathbf{p}(\tilde{\mathbf{G}}(\rho) - \tilde{\mathbf{H}}(\rho))\tilde{\mathbf{P}}(\rho)$, vzpostavitevni stroškov $\hat{\mathbf{K}}\tilde{\mathbf{v}}(\rho)$ in transportnih stroškov $\mathbf{U}^T(\tilde{\Pi}_G(\rho) + \tilde{\Pi}_H(\rho))\tilde{\mathbf{P}}(\rho)$:

$$\begin{aligned}
NSV &= \mathbf{p}(\tilde{\mathbf{G}}(\rho) - \tilde{\mathbf{H}}(\rho))\tilde{\mathbf{P}}(\rho) - \hat{\mathbf{K}}\tilde{\mathbf{v}}(\rho) - \mathbf{U}^T(\tilde{\mathbf{\Pi}}_G(\rho) + \tilde{\mathbf{\Pi}}_H(\rho))\tilde{\mathbf{P}}(\rho) = \\
&= 2.041.411,88 - 101.950,19 - 2.214.464,02 = \\
&= -275.002,33
\end{aligned} \tag{121}$$

Iz rezultata lahko razberemo, da je neto sedanja vrednost sistema negativna, kar je v največji meri posledica visokih transportnih stroškov. Proučevani sistem torej generira izgubo. Sistem lahko izboljšamo na več načinov, na primer z optimizacijo prostorskih alokacij celic aktivnosti. V razširjenem modelu pa je neto sedanja vrednost sistema močno odvisna tudi od aktivnosti povratne logistike; okoljski dejavniki torej bistveno vplivajo nanjo.

V opazovanem primeru se elementa D in E znotraj posamičnega cikla delno reciklirata in uporabita v novem ciklu, delno pa odstranita na deponijo in nadomestita z nakupom novih elementov. Lokacije reciklažnih in proizvodnih celic aktivnosti ter deponij vplivajo na transportne stroške. Kadar so stroški prevoza elementov do deponije relativno nizki v primerjavi s stroški prevoza recikliranih elementov do proizvodnih celic aktivnosti, se lahko zgodi, da bodo ob vpeljavi okoljskih taks optimalne stopnje reciklaže relativno nizke. Vpliv transportnih stroškov lahko opazujemo na primeru reciklaže elementa E iz komponente B. V Tabeli 4 prikazujemo vpliv končne stopnje reciklaže α_{EB} , ki je v obravnavanem numeričnem primeru zajeta v koeficient g_{82}^{14} izhodne matrike $\mathbf{G}$, na končno neto sedanjo vrednost sistema.

Tabela 4: Neto sedanja vrednost sistema v korelaciji s končno stopnjo reciklaže α_{EB}

g_{82}^{14}	g_{22}^{44}	$\mathbf{p}(\tilde{\mathbf{G}}(\rho) - \tilde{\mathbf{H}}(\rho))\tilde{\mathbf{P}}(\rho)$	$\mathbf{U}^T(\tilde{\mathbf{\Pi}}_G(\rho) + \tilde{\mathbf{\Pi}}_H(\rho))\tilde{\mathbf{P}}(\rho)$	NSV
0,392	1,608	2.041.411,88	- 2.214.464,02	- 275.002,33
0,500	1,500	2.048.971,73	- 2.190.957,79	- 243.936,24
0,750	1,250	2.066.471,39	- 2.136.545,21	- 172.024,00
1,000	1,000	2.083.971,05	- 2.082.132,63	- 100.111,76
1,250	0,750	2.101.470,72	- 2.027.720,04	- 28.199,51
1,34804	0,65196	2.108.333,38	- 2.006.381,61	0,00
1,500	0,500	2.118.970,38	- 1.973.307,46	43.712,73
1,750	0,250	2.136.470,04	- 1.918.894,88	115.624,97
2,000	0,000	2.153.969,70	- 1.864.482,30	187.537,21

Prva vrstica v Tabeli 4 prikazuje začetno stanje, ki ga obravnavamo v numeričnem primeru. Koeficient g_{82}^{14} lahko v obravnavanem primeru zavzame dovoljene vrednosti na intervalu med 0 in 2. Vrednost 0 pomeni, da iz B ne recikliramo nobene enote E, vrednost 2 pa pomeni popolno reciklažo, pri kateri s povratno logistiko razstavimo enoto B in ponovno uporabimo vse njene sestavne elemente E. Vrednost 2 znotraj obratne kosovnice torej pomeni, da iz ene

enote komponente B recikliramo 2 enoti elementa (surovine) E. Koeficient g_{22}^{44} predstavlja delež odpadnih elementov E, pri čemer za obravnavani primer velja $g_{22}^{44} = 2 - g_{82}^{14}$.

Iz Tabele 4 lahko razberemo, da se neto sedanja vrednost prihodkov ($\mathbf{p}(\tilde{\mathbf{G}}(\rho) - \tilde{\mathbf{H}}(\rho))\tilde{\mathbf{P}}(\rho)$) povečuje z naraščanjem končne stopnje reciklaže α_{EB} . Opazimo lahko tudi, da neto sedanja vrednost transportnih stroškov ($\mathbf{U}^T(\tilde{\mathbf{\Pi}}_G(\rho) + \tilde{\mathbf{\Pi}}_H(\rho))\tilde{\mathbf{P}}(\rho)$) v takšnem primeru upada. Ta upad je posledica relativno nizkih transportnih stroškov od reciklažnega do proizvodnega podsistema v primerjavi s stroški transporta odpadnih elementov na deponijo. Točka preloma je pri $\alpha_{EB} = 1,34804$; v tej točki postane opazovani sistem profitabilen.

Na podoben način kot reciklažo elementa (surovine) E iz elementa (komponente) B lahko opazujemo tudi reciklažo elementa (surovine) D iz elementa (komponente) C, kar prikazujemo znotraj Tabele 5. Tudi v tem primeru so v prvi vrstici inicialne vrednosti iz obravnavanega numeričnega primera. Neto sedanja vrednost sistema se z naraščanjem končne stopnje reciklaže α_{DC} znižuje, kar pomeni, da je korelacija med njima negativna. Neto sedanja vrednost prihodkov sicer tudi v tem primeru narašča z zviševanjem stopnje reciklaže. Vendar so transportni stroški recikliranih elementov nazaj v proizvodnjo višji od transportnih stroškov elementov na deponijo. Višje stopnje reciklaže tako povzročijo porast skupnih transportnih stroškov, kar ima negativen vpliv na celotno neto sedanjo vrednost sistema.

Tabela 5: Neto sedanja vrednost sistema v korelaciji s končno stopnjo reciklaže α_{DC}

g_{73}^{14}	g_{13}^{44}	$\mathbf{p}(\tilde{\mathbf{G}}(\rho) - \tilde{\mathbf{H}}(\rho))\tilde{\mathbf{P}}(\rho)$	$\mathbf{U}^T(\tilde{\mathbf{\Pi}}_G(\rho) + \tilde{\mathbf{\Pi}}_H(\rho))\tilde{\mathbf{P}}(\rho)$	NSV
0,284	1,716	2.041.411,88	- 2.214.464,02	- 275.002,33
0,000	2,000	1.988.376,22	- 2.136.018,60	- 249.592,57
0,150	1,850	2.016.388,01	- 2.177.451,04	- 263.013,22
0,500	1,500	2.081.748,86	- 2.274.126,74	- 294.328,07
1,000	1,000	2.175.121,51	- 2.412.234,89	- 339.063,57
1,500	0,500	2.268.494,15	- 2.550.343,04	- 383.799,07
2,000	0,000	2.361.866,80	- 2.688.451,18	- 428.534,57

Zaradi hitrejšega naraščanja $\mathbf{U}^T(\tilde{\mathbf{\Pi}}_G(\rho) + \tilde{\mathbf{\Pi}}_H(\rho))\tilde{\mathbf{P}}(\rho)$ glede na $\mathbf{p}(\tilde{\mathbf{G}}(\rho) - \tilde{\mathbf{H}}(\rho))\tilde{\mathbf{P}}(\rho)$ je ob trenutnih vrednostih okoljskih dajatev z vidika neto sedanje vrednosti sistema recikliranje elementa (surovin) D iz elementa (komponente) C neekonomično. Recikliranje pa postane ekonomsko sprejemljivo, če uspemo znižati transportne stroške med reciklažo in proizvodnjo. To lahko dosežemo z optimalnejšo lokacijsko postavitvijo reciklažnih celic aktivnosti ali pa z zvišanjem okoljskih dajatev, s čimer postanejo skupni stroški odlaganja odpadkov višji, zato se kljub visokim transportnim stroškom obnovljenih elementov v proizvodnjo poveča ekonomska privlačnost recikliranja.

3.1.7 Vpliv prostorskih in tehnoloških dejavnikov na izbiro lokacije reciklažnih celic aktivnosti

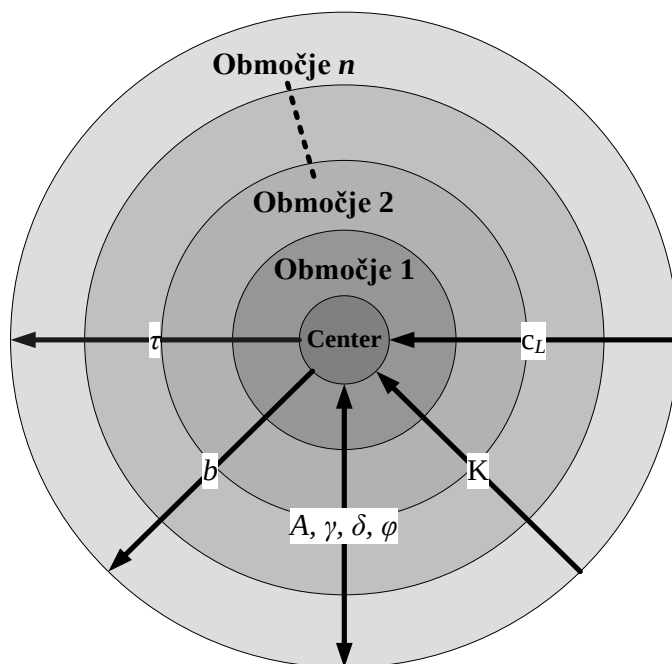
Pozicioniranje lokacije katerekoli celice aktivnosti znotraj oskrbovalne verige vpliva na časovne zakasnitve, do katerih prihaja pri materialnih tokovih med z njo povezanimi celicami aktivnosti, in raven transportnih stroškov. Oboje pa igra pomembno vlogo pri izračunu neto sedanje vrednosti celotne oskrbovalne verige. Vpliv teh dveh parametrov na izbor optimalnih lokacij reciklažnih celic aktivnosti predstavljamo v podpoglavjih 3.1.5 in 3.1.6. S prostorskim dislociranjem celic aktivnosti pa se spreminja tudi njihovo zunanje okolje in posledično dejavniki, ki vplivajo na neto sedanjo vrednost sistema kot celote. Pri določanju optimalne lokacije celice aktivnosti moramo zato upoštevati tudi njihov vpliv. V nadaljevanju prikazujemo, kako te dejavnike, ki jih zajemamo v Cobb-Douglasovi proizvodni funkciji (Sandelin, 1976), ustrezno vključimo v celoten model vhodno-izhodnih matrik reciklažnega podsistema, kar je bistvenega pomena za vzpostavitev ekonomsko-okoljskega ravnotežja.

Posamične celice aktivnosti vsakega izmed štirih podsistemov so prostorsko razpršene. Distribucija poteka preko distribucijskih centrov na različne lokacije. Končni izdelki vstopijo v potrošni podsistem na neomejenem številu končnih mikrolokacij, kjer se izrabijo. Izrabljeni končni proizvodi in elementi sistema, ki so predčasno izstopili iz proizvodnega ali distribucijskega podsistema, preko zbirnih centrov vstopijo v proces reciklaže. V večini primerov lahko predpostavimo, da predstavlja potrošnja glavni izvor elementov za reciklažo. Potrošnja pa običajno ni prostorsko enakomerno razporejena, ampak je v večini primerov odvisna od demografskih in ekonomskih dejavnikov. Večina potrošnje običajno poteka skoncentrirano znotraj prostorskih centrov, kot so na primer večja mesta in industrijska središča. Takšna središča pa običajno niso lokacijsko primerna za postavitve reciklažnih obratov. Reciklažne celice aktivnosti na nekem območju (npr. regiji) zato prostorsko umestimo v okolico potrošnih centrov. Območja pa se med seboj razlikujejo po tehnoloških, ekonomskih in pravno-formalnih dejavnikih (Slika 13). Potencialna lokacija reciklažne celice aktivnosti je lahko s prostorskega vidika relativno daleč od centra potrošnje, vendar ostaja privlačna zaradi tehnološke razvitosti, nizke cene delovne sile oziroma energije ali ugodnejše zakonodaje.

Posamična lokacija reciklažne celice aktivnosti določa časovne zakasnitve in transportne stroške na naslednjih relacijah celotne oskrbovalne verige:

- 1) potrošnja (zbirni centri) → obrat za reciklažo,
- 2) obrat za reciklažo → naslednji obrat za reciklažo (kadar se različne faze reciklaže elementa izvajajo na ločenih lokacijah),
- 3) obrat za reciklažo → deponija odpadnih elementov,
- 4) obrat za reciklažo → proizvodni obrat, v katerem se reciklirani element uporabi v novem ciklu.

Slika 13: Prikaz parametrov, ki vplivajo na izbiro optimalne lokacije za postavitev reciklažne celice aktivnosti



Bolj kot je reciklažna celica aktivnosti oddaljena od centra izvora odpadnih elementov, višje časovne zakasnitve τ in transportne stroške b lahko pričakujemo. Z vidika časovnih zakasnitev in transportnih stroškov je najbolj učinkovita postavitev reciklažnih obratov v bližino izvora elementov, namenjenih razstavljanju, ter hkrati v bližino proizvodnih celic aktivnosti, v katerih se reciklirani elementi ponovno uporabijo.

Naslednji pomemben dejavnik, ki vpliva na izbor optimalne lokacije reciklažne celice aktivnosti, je cena delovne sile c_L . Centri potrošnje običajno predstavljajo ekonomska središča, kjer so cene višje, kar pa je povezano tudi z višino dohodkov prebivalstva. Če reciklažne obrate odmaknemo od ekonomskih centrov ali jih preselimo v države z nižjo ceno delovne sile, lahko znižamo stroške dela, potrebnega za izvajanje reciklažnih procesov. Takšna lokacija je z vidika cene delovne sile sicer privlačnejša, običajno pa povzroči daljše časovne zakasnitve in višje transportne stroške.

Podobne predpostavke veljajo tudi za vzpostavitvene stroške. Cene nepremičnin in s tem tudi stroški postavitve reciklažnih obratov upadajo z oddaljenostjo od ekonomskih središč. Bolj oddaljene lokacije bodo s tega vidika privlačnejše, vendar na račun daljših časovnih zakasnitev ter višjih transportnih stroškov.

Cobb-Douglasova proizvodna funkcija je v svoji klasični obliki:

$$Q = AL^\gamma K^\delta \quad (122)$$

primerna tudi za proučevanje reciklaže. Celotno proizvodnjo Q reciklažnega podsistema namesto v finančnem smislu ovrednotimo kvantitativno, kot reciklirano količino elementov $\alpha\hat{P}$ znotraj enega cikla. Kot vhodni kapital K privzamemo vse vhodne elemente $\hat{P}$ v reciklažni podsistem (Grubbström et al. 2007). Uporaben izhod reciklažnega podsistema pa so reciklirani osnovni elementi, ki imajo določeno vrednost. Enakost $K = \hat{P}$ lahko razložimo z dejstvom, da moramo za zagotovitev določene izhodne količine recikliranih elementov pripeljati zadostno količino vhodnih elementov (končnih proizvodov oziroma komponent). Povečanje kontingenta vhodnih elementov $\hat{P}$ se odrazi v povečani količini izhodnih, recikliranih elementov Q . Količina vhodnih elementov torej igra pomembno vlogo v proizvodni funkciji in jo lahko pri proučevanju reciklažnih procesov obravnavamo kot vhodni kapital K .

Cobb-Douglasovo proizvodno funkcijo lahko posledično za reciklažne procese zapišemo v naslednji obliki:

$$\alpha\hat{P} = AL^\gamma\hat{P}^\delta \quad (123)$$

Pri tem je α stopnja reciklaže, tehnološki koeficient A predstavlja faktor produktivnosti, γ koeficient elastičnosti dela in δ koeficient elastičnosti kapitala. Koeficienti so sicer odvisni od prostorske umestitve reciklažne celice aktivnosti, vendar niso neposredno odvisni od oddaljenosti od ekonomskih centrov.

V 70. letih prejšnjega stoletja visoke cene energentov zmanjšajo proizvodnjo in gospodarstva pripeljejo v recesijo. Takratna energetska kriza dokaže, da zgolj delo in kapital nista zadostni sestavini proizvodnih funkcij (Berndt & Wood, 1979; Hudson & Jorgenson, 1974; Tintner, Deutsch, Rieder & Rosner, 1977). Končna proizvodnja je namreč v veliki meri odvisna tudi od vhodne energije:

$$Y(t) = f(K(t), L(t), E(t)) \quad (124)$$

Veliko raziskovalnih del proučuje in uporablja razširitve Cobb-Douglasove proizvodne funkcije z dodatnimi vhodi, pri čemer dajemo poseben poudarek energiji. Wei (2007) podaja nazoren primer vključitve energije kot vhoda, Liao, Wu in Xu (2010) pa gredo še korak dlje in energijo delijo na čisto energijo (sončna, vetrna, morska s pomočjo biobavice, nuklearna) in nečisto energijo (premog in druga fosilna goriva, ki onesnažujejo okolje); označujejo ju z E_1 in E_2 :

$$Y(t) = f(K(t), L(t), E_1(t), E_2(t)) \quad (125)$$

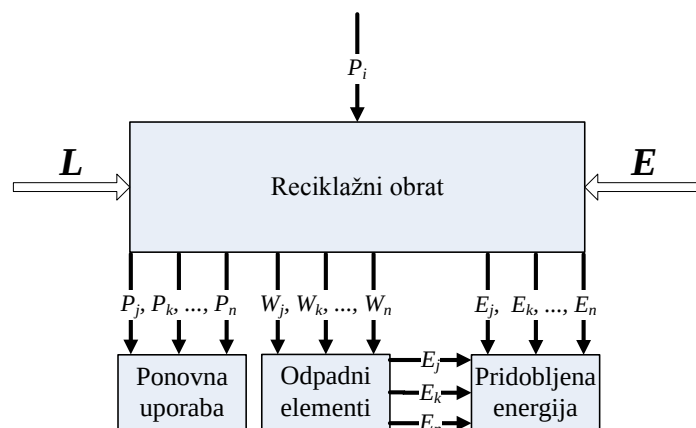
Za proučevanje proizvodnih in reciklažnih procesov lahko uporabimo tudi proizvodne funkcije, ki niso Cobb-Douglasovega tipa. Kümmel, Henn in Lindenberger (2002) ter Kümmel, Strassl, Gossner in Eichhorn (1985) obravnavajo proizvodno funkcijo LINEX, ki je linearno odvisna od energije in eksponentno odvisna od količnikov kapitala, dela in energije. Ta proizvodna funkcija temelji na zakonih termodinamike in daje za razliko od Cobb-

Douglasove funkcije večji poudarek fizikalnim in tehnološkim omejitvam sistema. V takšnem modelu je mogoče obravnavati okoljske dejavnike (onesnaževanje) in vpliv uporabe recikliranih elementov na proizvodnjo oziroma njeno rast (Kümmel, 1980).

Z vidika proučevanja reciklažnih procesov je uvedba energije kot vhodnega parametra smiselna, kar shematično prikazujemo na Sliki 14. V reciklažni obrat vstopajo posamične vhodne komponente P_i , namenjene razgradnji. Za izvedbo reciklažnih aktivnosti potrebujemo zadostno količino delovne sile L in energije E . Rezultati reciklaže posamičnega vhodnega elementa (komponente) so:

- 1) sestavni elementi $P_j, P_k, \dots, P_n$ komponente P_i , ki jih uspešno recikliramo in so namenjeni ponovni uporabi znotraj proizvodnega podsistema,
- 2) odpadni elementi $W_j, W_k, \dots, W_n$, ki niso reciklirani in zaključijo svoj življenjski cikel na deponiji,
- 3) energija $E_j, E_k, \dots, E_n$, ki jo lahko v nekaterih primerih pridobivamo ob razstavljanju na posamične elemente $j, k, \dots, n$.

Slika 14: Prikaz vhodnih elementov, potrebnih za izvedbo reciklažnih aktivnosti in njenih izhodov: reciklirani in odpadni elementi ter energija



Energija se lahko v reciklažnem podsistemu pojavlja kot eden od rezultatov aktivnosti, v drugih treh podsistemih pa praviloma nastopa izključno kot vhodni parameter. Energijo lahko povratno pridobivamo z dvema ločenima postopkoma:

- 1) pri razstavljanju komponente na njene sestavne elemente,
- 2) pri kemijskem razkrajanju odpadnih elementov na deponiji ali njihovem sežiganju v sežigalnicah (na primer tehnološko uveljavljena praksa pridobivanja električne energije iz plinov, ki se sproščajo pri razkrajanju odpadkov na deponijah).

Tako pridobljeno energijo lahko obravnavamo kot reciklirano oziroma čisto. Tehnološki postopki povratnega pridobivanja pa so običajno kompleksni in dragi, zato lahko povečanje na tak način pridobljene energije stimuliramo z višjimi odkupnimi cenami, kot so uveljavljene na trgu. Tako pridobljeno energijo lahko posamična reciklažna celica aktivnosti uporabi tudi neposredno za pokrivanje lastnih energetske potreb.

Za namene obravnave reciklažnih aktivnosti v razširjeni teoriji planiranja materialnih potreb lahko uporabimo poljubno proizvodno funkcijo. V nadaljevanju bomo zaradi poenostavljene obravnave uporabili razširjeno Cobb-Douglasovo proizvodno funkcijo, ki kot vhodni parameter vključuje tudi energijo:

$$\alpha \hat{P} = A L^\gamma \hat{P}^\delta E^\varphi \quad (126)$$

Z vidika reciklažnih postopkov je bistveno, da tehnološki koeficient A poleg tehnološke učinkovitosti (produktivnosti) vključuje tudi energetske učinkovitost. Reciklažni procesi so energetske potratni, zato lahko ravno razlike v učinkovitosti in ceni energije c_E (fosilna goriva, električna energija itd.) naredijo določeno lokacijo ekonomsko privlačnejšo od konkurenčnih lokacij, kljub morda nekoliko višji ceni delovne sile c_L ali vzpostavitevni stroškom.

Z uporabo enačbe (126) izračunamo stopnjo reciklaže na nivoju posamične celice aktivnosti i na naslednji način:

$$\alpha_i = A_i L_i^\gamma P_i^{\delta-1} E_i^\varphi \quad (127)$$

Z zamenjavo parcialne stopnje reciklaže α_i posamične celice aktivnosti v enačbi (91) s parametri proizvodne funkcije, ki veljajo za to celico aktivnosti, v enačbi (127) lahko končno stopnjo reciklaže za elementarni element k , ki se reciklira iz komponente l , zapišemo kot:

$$\alpha_{kl} = \sum_{n'=l}^3 \left(\prod_{i=k,l,l-1,\dots,n',4}^{n',4} \beta_i A_i L_i^\gamma P_i^{\delta-1} E_i^\varphi \right)_n, \quad (128)$$

Če želimo proučevati vpliv reciklažnih aktivnosti na ekonomičnost celotnega sistema, moramo pri izračunavanju neto sedanje vrednosti celotnega sistema vključiti tudi stroške, ki izvirajo iz reciklaže:

$$\begin{aligned} \text{NSV} = & \mathbf{p} \left(\tilde{\mathbf{G}}(\rho) - \tilde{\mathbf{H}}(\rho) \right) \tilde{\mathbf{P}}(\rho) - \hat{\mathbf{K}} \tilde{\mathbf{v}}(\rho) - \mathbf{U}^T \left(\tilde{\Pi}_G(\rho) + \tilde{\Pi}_H(\rho) \right) \tilde{\mathbf{P}}(\rho) - \\ & - \mathbf{c}_L \hat{\mathbf{L}} \tilde{\mathbf{v}}(\rho) - \mathbf{U}^T \left(\tilde{\mathbf{E}}_H(\rho) - \tilde{\mathbf{E}}_G(\rho) \right) \tilde{\mathbf{P}}(\rho) \end{aligned} \quad (129)$$

Ker smo s proizvodno funkcijo v reciklažni podsystem vpeljali delovno silo in energijo, se pri izračunu neto sedanje vrednosti dodatno upoštevata:

1) strošek delovne sile, ki ga izračunamo kot:

$$\mathbf{c}_L \hat{\mathbf{L}} \tilde{\mathbf{v}}(\rho) \quad (130)$$

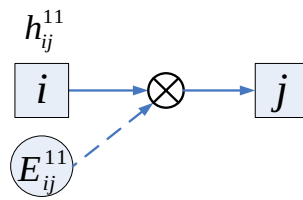
2) strošek energije, ki ga izračunamo kot:

$$\mathbf{U}^T (\tilde{\mathbf{E}}_H(\rho) - \tilde{\mathbf{E}}_G(\rho)) \tilde{\mathbf{P}}(\rho) \quad (131)$$

Pri tem je $\mathbf{c}_L$ cena delovne sile, $\mathbf{c}_L \hat{\mathbf{L}} \tilde{\mathbf{v}}(\rho) = \tilde{\mathbf{L}}(\rho)$ delovni plan, $\tilde{\mathbf{E}}_H(\rho)$ je generalizirana vhodna energetska matrika in $\tilde{\mathbf{E}}_G(\rho)$ generalizirana izhodna energetska matrika. Strošek energije lahko bistveno vpliva na ekonomičnost reciklažnih procesov, predstavlja pa tudi pomemben vhodni parameter drugih celic aktivnosti celostne oskrbovalne verige.

Energetske potrebe se pojavijo že na samem začetku oskrbovalne verige, v proizvodnem podsistemu. Vključitev potreb po energiji prikazujemo na Sliki 15, kjer pri sestavljanju ene enote elementa j uporabimo h_{ij}^{11} enot elementa i . Prikazani sta torej dve zaporedni celici aktivnosti montažnega sistema, v katerih se pojavijo zahteve po E_{ij}^{11} enotah energije za vsak element i , ki ga želimo transformirati v višje ležeči element j znotraj kosovnice.

Slika 15: Dve celici aktivnosti proizvodnega podsistema, kjer pri sestavljanju ene enote elementa j uporabimo h_{ij}^{11} enot elementa i , za kar potrebujemo E_{ij}^{11} enot energije na element i



Energija, kot je v nadaljevanju vključena v model vhodno-izhodnih matrik, nas pri izračunu neto sedanje vrednosti ne zanima s količinskega vidika, temveč s stroškovno-prihodkovnega vidika. Strošek vhodne energije ε_{ij}^H v celici aktivnosti i , ki nastane s transformacijo enote i v enoto j , izrazimo s produktom cene energije na enoto c_{ij}^E znotraj te celice aktivnosti in količine potrebne energije E_{ij}^H za transformacijo ene enote elementa:

$$\varepsilon_{ij}^H = c_{ij}^E E_{ij}^H \quad (132)$$

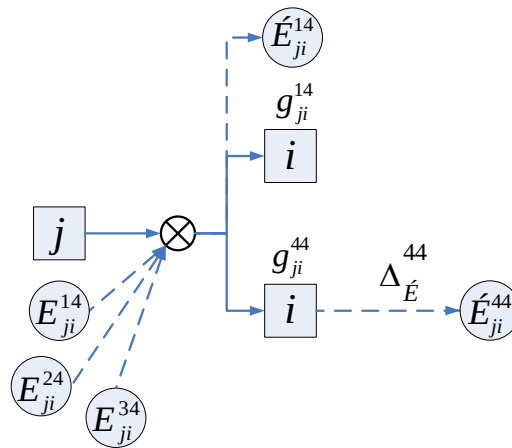
Na podoben način izračunamo tudi vrednost izhodne energije $\acute{\varepsilon}_{ji}^G$, ki nastane kot stranski produkt demontažnih aktivnosti ene enote elementa j na več gradnikov (elementov) i :

$$\acute{\varepsilon}_{ji}^G = p_{ji}^E \acute{E}_{ji}^G \quad (133)$$

Tako pridobljena energija $\dot{E}_{ji}^G$ znotraj celice aktivnosti lahko dosega drugačno tržno ceno na enoto p_{ji}^E , kot pa znaša strošek vhodne energije c_{ji}^E v isti celici aktivnosti. Politika aktivno vpliva na povečevanje izrabe obnovljivih virov energije z diferenciacijo $p_{ji}^E > c_{ji}^E$, ki je lahko posledica subvencioniranega odkupa energije nad njeno siceršnjo tržno vrednostjo, kar ima pozitivne vplive na dolgoročno ekonomsko-okoljsko vzdržnost celostne oskrbovalne verige.

Na Sliki 16 prikazujemo proces razgradnje ene enote elementa j na več elementov i ter energijo, ki je zahtevana kot vhod v sistem, in njeno morebitno povratno pridobivanje.

Slika 16: Energija kot vhod in izhod pri razstavljanju elementa j na komponente i



Rezultat razstavljanja elementa j , ki lahko v sistem vstopi iz poljubnega izvornega podsistema, je element i , ki se v razmerju g_{ji}^{14} uspešno reciklira, preostanek v razmerju g_{ji}^{44} pa so nerekiclrani elementi, odloženi na deponijo. Pri razgradnji ene enote elementa j , ki v podsystem reciklaže vstopi iz proizvodnega, distribucijskega oziroma potrošnega podsistema, potrebujemo E_{ji}^{14} , E_{ji}^{24} oziroma E_{ji}^{34} enot vhodne energije.

Tekom procesa razgradnje elementa j lahko v določenih primerih uspešno recikliramo tudi del energije $\dot{E}_{ji}^{14}$. Predpostavimo, da se tako pridobljena energija pojavi v istem časovnem trenutku kot uspešno reciklrani element i . Določeno količino energije pa lahko pridobimo tudi iz odpadnih elementov, ki niso primerni za ponovno uporabo (npr. sežiganje, kemijski procesi ipd.). Energija $\dot{E}_{ji}^{44}$, ki je rezultat razpada sestavnih komponent ene enote elementa j , se praviloma pojavi z določenim časovnim zamikom, kar na Sliki 16 označujemo z $\Delta \dot{E}$. Gre za čas, ki je potreben za potek kemijskih procesov razgradnje ali sežiga odpadnih elementov. V sistem torej uvajamo dodatno časovno zakasnitev, ki je v nadaljevanju vključena v izhodno generalizirano energetska matriko $\tilde{\mathbf{E}}_G(s)$.

V skladu z zgoraj opisanim načinom vključitve energetskih tokov v model štirih podsistemov lahko zapišemo generalizirano vhodno energetsko matriko $\tilde{\mathbf{E}}_H(s)$ v naslednji obliki:

$$\tilde{\mathbf{E}}_H(s) = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{E}}_{11}^H(s) & 0 & 0 & \tilde{\mathbf{E}}_{14}^H(s) \\ 0 & 0 & 0 & \tilde{\mathbf{E}}_{24}^H(s) \\ 0 & 0 & 0 & \tilde{\mathbf{E}}_{34}^H(s) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (134)$$

Pozitivne podmatrike se pojavijo samo znotraj tistih podsistemov, v katerih so dejansko prisotne vhodne energijske potrebe. Na proučevanem modelu prihaja do teh potreb samo znotraj proizvodnega podsistema (podmatrika $\tilde{\mathbf{E}}_{11}^H(s)$) in reciklažnega podsistema (podmatrike $\tilde{\mathbf{E}}_{14}^H(s)$, $\tilde{\mathbf{E}}_{24}^H(s)$ in $\tilde{\mathbf{E}}_{34}^H(s)$). Energijske potrebe distribucijskega podsistema (npr. gorivo, potrebno za transport) namreč zajemamo že v transportnih stroških, zato jih v energetski matriki ne podvajamo. Alternativni vidik obravnave problema je, da vhodne energijske potrebe distribucijskega podsistema vključimo v generalizirano vhodno energetsko matriko, strošek goriva pa ustrezno izločimo iz matrik transportnih stroškov. Podobna predpostavka velja za potrošni podsistem, v katerem obravnavamo izključno izrabo izdelka. Model je mogoče razširiti tako, da upoštevamo tudi vhodne energijske potrebe končnega izdelka med njegovo celotno življenjsko dobo. Z vidika globalnega okoljskega ravnotežja bi lahko takšno nadgradnjo modela uporabili pri primerjavi različnih končnih proizvodov z različnimi stopnjami energijske učinkovitosti (poraba goriva pri avtomobilih, poraba električne energije pri električnih aparatih itd.).

Splošna struktura pozitivnih vhodnih generaliziranih energetskih podmatrik matrike $\tilde{\mathbf{E}}_H(s)$ temelji na strukturah pozitivnih vhodnih generaliziranih podmatrik znotraj $\tilde{\mathbf{H}}(s)$, saj so vhodne energetske potrebe tesno povezane z materialnim tokom.

Na tem mestu velja nameniti posebno pozornost časovnim zakasnitvam. V strukturi generalizirane vhodne energetske matrike $\tilde{\mathbf{E}}_H(s)$ so upoštevane tako transportne kot proizvodne časovne zakasnitve. Transportne časovne zakasnitve energije $e^{s(\tau_{ij}^H)^r}$ se bodo pojavile izključno v primeru fizične distribucije energije (npr. dostava nafte, premoga itd.). V primeru energije, ki je na voljo brez fizične distribucije (npr. električna energija), so transportne časovne zakasnitve vedno enake 0. Energijske transportne časovne zakasnitve pa se razlikujejo od transportnih časovnih zakasnitev materialnega toka elementov sistema (komponent in končnih proizvodov).

Strukture posamičnih neničelnih energetskih podmatrik so v splošni obliki:

$$\tilde{\mathbf{E}}_{11}^H(s) = \tilde{\mathbf{E}}_{11}^{H^r}(s) \tilde{\mathbf{r}}_{11}^{pr}(s) = \quad (135)$$

$$= \begin{bmatrix}
0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\
0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\
\varepsilon_{31}^{11} h_{31}^{11} e^{s(\tau_{31}^{11})^{tr}} & 0 & \varepsilon_{33}^{11} h_{33}^{11} e^{s(\tau_{33}^{11})^{tr}} & \dots & \varepsilon_{3n}^{11} h_{3n}^{11} e^{s(\tau_{3n}^{11})^{tr}} \\
0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\
\varepsilon_{51}^{11} h_{51}^{11} e^{s(\tau_{51}^{11})^{tr}} & \varepsilon_{52}^{11} h_{52}^{11} e^{s(\tau_{52}^{11})^{tr}} & 0 & \dots & \varepsilon_{5n}^{11} h_{5n}^{11} e^{s(\tau_{5n}^{11})^{tr}} \\
0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\varepsilon_{(2n-1)1}^{11} h_{(2n-1)1}^{11} e^{s(\tau_{(2n-1)1}^{11})^{tr}} & \varepsilon_{(2n-1)2}^{11} h_{(2n-1)2}^{11} e^{s(\tau_{(2n-1)2}^{11})^{tr}} & \varepsilon_{(2n-1)3}^{11} h_{(2n-1)3}^{11} e^{s(\tau_{(2n-1)3}^{11})^{tr}} & \dots & 0 \\
0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\
\varepsilon_{(2n+1)1}^{11} h_{(2n+1)1}^{11} e^{s(\tau_{(2n+1)1}^{11})^{tr}} & \varepsilon_{(2n+1)2}^{11} h_{(2n+1)2}^{11} e^{s(\tau_{(2n+1)2}^{11})^{tr}} & \varepsilon_{(2n+1)3}^{11} h_{(2n+1)3}^{11} e^{s(\tau_{(2n+1)3}^{11})^{tr}} & \dots & \varepsilon_{(2n+1)n}^{11} h_{(2n+1)n}^{11} e^{s(\tau_{(2n+1)n}^{11})^{tr}} \\
\varepsilon_{(2n+2)1}^{11} h_{(2n+2)1}^{11} e^{s(\tau_{(2n+2)1}^{11})^{tr}} & \varepsilon_{(2n+2)2}^{11} h_{(2n+2)2}^{11} e^{s(\tau_{(2n+2)2}^{11})^{tr}} & \varepsilon_{(2n+2)3}^{11} h_{(2n+2)3}^{11} e^{s(\tau_{(2n+2)3}^{11})^{tr}} & \dots & \varepsilon_{(2n+2)n}^{11} h_{(2n+2)n}^{11} e^{s(\tau_{(2n+2)n}^{11})^{tr}} \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\varepsilon_{m1}^{11} h_{m1}^{11} e^{s(\tau_{m1}^{11})^{tr}} & \varepsilon_{m2}^{11} h_{m2}^{11} e^{s(\tau_{m2}^{11})^{tr}} & \varepsilon_{m3}^{11} h_{m3}^{11} e^{s(\tau_{m3}^{11})^{tr}} & \dots & \varepsilon_{mn}^{11} h_{mn}^{11} e^{s(\tau_{mn}^{11})^{tr}}
\end{bmatrix} \begin{bmatrix}
e^{s(\tau_1^{11})^{pr}} & \dots & 0 \\
\vdots & \ddots & \vdots \\
0 & \dots & e^{s(\tau_n^{11})^{pr}}
\end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix}
0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\
0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\
\varepsilon_{31}^{11} h_{31}^{11} e^{s(\tau_{31}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_1^{11})^{pr}} & 0 & \varepsilon_{33}^{11} h_{33}^{11} e^{s(\tau_{33}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_3^{11})^{pr}} & \dots & \varepsilon_{3n}^{11} h_{3n}^{11} e^{s(\tau_{3n}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_n^{11})^{pr}} \\
0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\
\varepsilon_{51}^{11} h_{51}^{11} e^{s(\tau_{51}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_1^{11})^{pr}} & \varepsilon_{52}^{11} h_{52}^{11} e^{s(\tau_{52}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_2^{11})^{pr}} & 0 & \dots & \varepsilon_{5n}^{11} h_{5n}^{11} e^{s(\tau_{5n}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_n^{11})^{pr}} \\
0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\varepsilon_{(2n-1)1}^{11} h_{(2n-1)1}^{11} e^{s(\tau_{(2n-1)1}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_1^{11})^{pr}} & \varepsilon_{(2n-1)2}^{11} h_{(2n-1)2}^{11} e^{s(\tau_{(2n-1)2}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_2^{11})^{pr}} & \varepsilon_{(2n-1)3}^{11} h_{(2n-1)3}^{11} e^{s(\tau_{(2n-1)3}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_3^{11})^{pr}} & \dots & 0 \\
0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\
\varepsilon_{(2n+1)1}^{11} h_{(2n+1)1}^{11} e^{s(\tau_{(2n+1)1}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_1^{11})^{pr}} & \varepsilon_{(2n+1)2}^{11} h_{(2n+1)2}^{11} e^{s(\tau_{(2n+1)2}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_2^{11})^{pr}} & \varepsilon_{(2n+1)3}^{11} h_{(2n+1)3}^{11} e^{s(\tau_{(2n+1)3}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_3^{11})^{pr}} & \dots & \varepsilon_{(2n+1)n}^{11} h_{(2n+1)n}^{11} e^{s(\tau_{(2n+1)n}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_n^{11})^{pr}} \\
\varepsilon_{(2n+2)1}^{11} h_{(2n+2)1}^{11} e^{s(\tau_{(2n+2)1}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_1^{11})^{pr}} & \varepsilon_{(2n+2)2}^{11} h_{(2n+2)2}^{11} e^{s(\tau_{(2n+2)2}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_2^{11})^{pr}} & \varepsilon_{(2n+2)3}^{11} h_{(2n+2)3}^{11} e^{s(\tau_{(2n+2)3}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_3^{11})^{pr}} & \dots & \varepsilon_{(2n+2)n}^{11} h_{(2n+2)n}^{11} e^{s(\tau_{(2n+2)n}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_n^{11})^{pr}} \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\varepsilon_{m1}^{11} h_{m1}^{11} e^{s(\tau_{m1}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_1^{11})^{pr}} & \varepsilon_{m2}^{11} h_{m2}^{11} e^{s(\tau_{m2}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_2^{11})^{pr}} & \varepsilon_{m3}^{11} h_{m3}^{11} e^{s(\tau_{m3}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_3^{11})^{pr}} & \dots & \varepsilon_{mn}^{11} h_{mn}^{11} e^{s(\tau_{mn}^{11})^{tr}} e^{s(\tau_n^{11})^{pr}}
\end{bmatrix}$$

$$\tilde{\mathbf{E}}_{14}^H(s) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \varepsilon_{21}^{14} h_{21}^{14} e^{s\tau_{21}^{14}} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \varepsilon_{42}^{14} h_{42}^{14} e^{s\tau_{42}^{14}} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{63}^{14} h_{63}^{14} e^{s\tau_{63}^{14}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \varepsilon_{(2n)n}^{14} h_{(2n)n}^{14} e^{s\tau_{(2n)n}^{14}} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (136)$$

$$\tilde{\mathbf{E}}_{24}^H(s) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \varepsilon_{(r+1)1}^{24} h_{(r+1)1}^{24} e^{s\tau_{(r+1)1}^{24}} & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (137)$$

$$\tilde{\mathbf{E}}_{34}^H(s) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^{34} h_{11}^{34} e^{s\tau_{11}^{34}} & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (138)$$

Na podoben način kot generalizirano vhodno energetska matriko $\tilde{\mathbf{E}}_H(s)$ v splošni obliki zapišemo tudi generalizirano izhodno energetska matriko $\tilde{\mathbf{E}}_G(s)$:

$$\tilde{\mathbf{E}}_G(s) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \tilde{\mathbf{E}}_{14}^G(s) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \tilde{\mathbf{E}}_{44}^G(s) \end{bmatrix} \quad (139)$$

V modelu predpostavljamo, da se lahko energija pojavi kot izhod izključno znotraj reciklažnega podsistema (Slika 16), zato sta neničelni samo podmatriki $\tilde{\mathbf{E}}_{14}^G(s)$ in $\tilde{\mathbf{E}}_{44}^G(s)$. Pri vseh drugih podsistemih pa se energija zgolj porablja za izvedbo zahtevanih aktivnosti. Z reciklažnimi procesi pridobljeno energijo lahko obravnavamo kot zeleno energijo in pričakujemo lahko, da ob upoštevanju subvencionirane odkupne cene ta zvišuje neto sedanjo vrednost celotnega sistema. Reciklaža energije pa ni ekonomično smiselna, kadar je neto sedanja vrednost vzpostavitev stroškov infrastrukture za povratno pridobivanje energije višja od neto sedanje vrednosti reciklirane energije. S pomočjo predstavljenega modela lahko

torej med drugim proučujemo tudi smotrnost investicije v infrastrukturo za povratno pridobivanje energije.

Pozitivni podmatriki generalizirane izhodne energetske matrike $\tilde{\mathbf{E}}_G(s)$ lahko v splošni obliki zapišemo na naslednji način:

$$\tilde{\mathbf{E}}_{14}^G(s) = \tilde{\Delta}_{14}^{pr}(s) \tilde{\mathbf{E}}_{14}^{G^{tr}}(s) = \quad (140)$$

$$= \begin{bmatrix} e^{-s(\Delta_1^{14})^{pr}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & e^{-s(\Delta_m^{14})^{pr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \hline \hat{\epsilon}_{(2n+1)1}^{14} g_{(2n+1)1}^{14} & \hat{\epsilon}_{(2n+1)2}^{14} g_{(2n+1)2}^{14} & \cdots & \hat{\epsilon}_{(2n+1)n}^{14} g_{(2n+1)n}^{14} \\ e^{-s(\Delta_{(2n+1)1}^{14})^{tr}} & e^{-s(\Delta_{(2n+1)2}^{14})^{tr}} & \cdots & e^{-s(\Delta_{(2n+1)n}^{14})^{tr}} \\ \hline \hat{\epsilon}_{(2n+2)1}^{14} g_{(2n+2)1}^{14} & \hat{\epsilon}_{(2n+2)2}^{14} g_{(2n+2)2}^{14} & \cdots & \hat{\epsilon}_{(2n+2)n}^{14} g_{(2n+2)n}^{14} \\ e^{-s(\Delta_{(2n+2)1}^{14})^{tr}} & e^{-s(\Delta_{(2n+2)2}^{14})^{tr}} & \cdots & e^{-s(\Delta_{(2n+2)n}^{14})^{tr}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{\epsilon}_{m1}^{14} g_{m1}^{14} e^{-s(\Delta_{m1}^{14})^{tr}} & \hat{\epsilon}_{m2}^{14} g_{m2}^{14} e^{-s(\Delta_{m2}^{14})^{tr}} & \cdots & \hat{\epsilon}_{mn}^{14} g_{mn}^{14} e^{-s(\Delta_{mn}^{14})^{tr}} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \hline e^{-s(\Delta_{2n+1}^{14})^{pr}} \hat{\epsilon}_{(2n+1)1}^{14} & e^{-s(\Delta_{2n+1}^{14})^{pr}} \hat{\epsilon}_{(2n+1)2}^{14} & \cdots & e^{-s(\Delta_{2n+1}^{14})^{pr}} \hat{\epsilon}_{(2n+1)n}^{14} \\ g_{(2n+1)1}^{14} e^{-s(\Delta_{(2n+1)1}^{14})^{tr}} & g_{(2n+1)2}^{14} e^{-s(\Delta_{(2n+1)2}^{14})^{tr}} & \cdots & g_{(2n+1)n}^{14} e^{-s(\Delta_{(2n+1)n}^{14})^{tr}} \\ \hline e^{-s(\Delta_{2n+2}^{14})^{pr}} \hat{\epsilon}_{(2n+2)1}^{14} & e^{-s(\Delta_{2n+2}^{14})^{pr}} \hat{\epsilon}_{(2n+2)2}^{14} & \cdots & e^{-s(\Delta_{2n+2}^{14})^{pr}} \hat{\epsilon}_{(2n+2)n}^{14} \\ g_{(2n+2)1}^{14} e^{-s(\Delta_{(2n+2)1}^{14})^{tr}} & g_{(2n+2)2}^{14} e^{-s(\Delta_{(2n+2)2}^{14})^{tr}} & \cdots & g_{(2n+2)n}^{14} e^{-s(\Delta_{(2n+2)n}^{14})^{tr}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-s(\Delta_m^{14})^{pr}} \hat{\epsilon}_{m1}^{14} & e^{-s(\Delta_m^{14})^{pr}} \hat{\epsilon}_{m2}^{14} & \cdots & e^{-s(\Delta_m^{14})^{pr}} \hat{\epsilon}_{mn}^{14} \\ g_{m1}^{14} e^{-s(\Delta_{m1}^{14})^{tr}} & g_{m2}^{14} e^{-s(\Delta_{m2}^{14})^{tr}} & \cdots & g_{mn}^{14} e^{-s(\Delta_{mn}^{14})^{tr}} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
\tilde{\mathbf{E}}_{44}^G(s) &= \tilde{\Delta}_{44}^{pr}(s) \tilde{\mathbf{E}}_{44}^{G^{tr+\hat{E}}}(s) = \\
&= \begin{bmatrix} e^{-s(\Delta_1^{44})^{pr}} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & e^{-s(\Delta_{m-2n}^{44})^{pr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_{11}^{44} \mathcal{G}_{11}^{44} & \dot{\epsilon}_{12}^{44} \mathcal{G}_{12}^{44} & \dots & \dot{\epsilon}_{1n}^{44} \mathcal{G}_{1n}^{44} \\ e^{-s(\Delta_{11}^{44})^{tr}} e^{-s(\Delta_{11}^{44})^{\hat{E}}} & e^{-s(\Delta_{12}^{44})^{tr}} e^{-s(\Delta_{12}^{44})^{\hat{E}}} & \dots & e^{-s(\Delta_{1n}^{44})^{tr}} e^{-s(\Delta_{1n}^{44})^{\hat{E}}} \\ \dot{\epsilon}_{21}^{44} \mathcal{G}_{21}^{44} & \dot{\epsilon}_{22}^{44} \mathcal{G}_{22}^{44} & \dots & \dot{\epsilon}_{2n}^{44} \mathcal{G}_{2n}^{44} \\ e^{-s(\Delta_{21}^{44})^{tr}} e^{-s(\Delta_{21}^{44})^{\hat{E}}} & e^{-s(\Delta_{22}^{44})^{tr}} e^{-s(\Delta_{22}^{44})^{\hat{E}}} & \dots & e^{-s(\Delta_{2n}^{44})^{tr}} e^{-s(\Delta_{2n}^{44})^{\hat{E}}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \dot{\epsilon}_{(m-2n)1}^{44} \mathcal{G}_{(m-2n)1}^{44} & \dot{\epsilon}_{(m-2n)2}^{44} \mathcal{G}_{(m-2n)2}^{44} & \dots & \dot{\epsilon}_{(m-2n)n}^{44} \mathcal{G}_{(m-2n)n}^{44} \\ e^{-s(\Delta_{(m-2n)1}^{44})^{tr}} e^{-s(\Delta_{(m-2n)1}^{44})^{\hat{E}}} & e^{-s(\Delta_{(m-2n)2}^{44})^{tr}} e^{-s(\Delta_{(m-2n)2}^{44})^{\hat{E}}} & \dots & e^{-s(\Delta_{(m-2n)n}^{44})^{tr}} e^{-s(\Delta_{(m-2n)n}^{44})^{\hat{E}}} \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} e^{-s(\Delta_1^{44})^{pr}} \dot{\epsilon}_{11}^{44} \mathcal{G}_{11}^{44} & e^{-s(\Delta_1^{44})^{pr}} \dot{\epsilon}_{12}^{44} \mathcal{G}_{12}^{44} & \dots & e^{-s(\Delta_1^{44})^{pr}} \dot{\epsilon}_{1n}^{44} \mathcal{G}_{1n}^{44} \\ e^{-s(\Delta_{11}^{44})^{tr}} e^{-s(\Delta_{11}^{44})^{\hat{E}}} & e^{-s(\Delta_{12}^{44})^{tr}} e^{-s(\Delta_{12}^{44})^{\hat{E}}} & \dots & e^{-s(\Delta_{1n}^{44})^{tr}} e^{-s(\Delta_{1n}^{44})^{\hat{E}}} \\ e^{-s(\Delta_2^{44})^{pr}} \dot{\epsilon}_{21}^{44} \mathcal{G}_{21}^{44} & e^{-s(\Delta_2^{44})^{pr}} \dot{\epsilon}_{22}^{44} \mathcal{G}_{22}^{44} & \dots & e^{-s(\Delta_2^{44})^{pr}} \dot{\epsilon}_{2n}^{44} \mathcal{G}_{2n}^{44} \\ e^{-s(\Delta_{21}^{44})^{tr}} e^{-s(\Delta_{21}^{44})^{\hat{E}}} & e^{-s(\Delta_{22}^{44})^{tr}} e^{-s(\Delta_{22}^{44})^{\hat{E}}} & \dots & e^{-s(\Delta_{2n}^{44})^{tr}} e^{-s(\Delta_{2n}^{44})^{\hat{E}}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-s(\Delta_{(m-2n)}^{44})^{pr}} \dot{\epsilon}_{(m-2n)1}^{44} \mathcal{G}_{(m-2n)1}^{44} & e^{-s(\Delta_{(m-2n)}^{44})^{pr}} \dot{\epsilon}_{(m-2n)2}^{44} \mathcal{G}_{(m-2n)2}^{44} & \dots & e^{-s(\Delta_{(m-2n)}^{44})^{pr}} \dot{\epsilon}_{(m-2n)n}^{44} \mathcal{G}_{(m-2n)n}^{44} \\ e^{-s(\Delta_{(m-2n)1}^{44})^{tr}} e^{-s(\Delta_{(m-2n)1}^{44})^{\hat{E}}} & e^{-s(\Delta_{(m-2n)2}^{44})^{tr}} e^{-s(\Delta_{(m-2n)2}^{44})^{\hat{E}}} & \dots & e^{-s(\Delta_{(m-2n)n}^{44})^{tr}} e^{-s(\Delta_{(m-2n)n}^{44})^{\hat{E}}} \end{bmatrix}
\end{aligned}
\tag{141}$$

Energijo pridobimo šele v tistem časovnem trenutku, ko je vhodni element j reciklažnega podsistema v celoti razstavljen. Pri izhodni generalizirani energetske matriki $\tilde{\mathbf{E}}_G(s)$ zato transportne in proizvodne časovne zakasnitve vedno sovpadajo z enakoležnimi časovnimi zakasnitvami v generalizirani izhodni matriki $\tilde{\mathbf{G}}(s)$. Kot prikazujemo na Sliki 16, pa se lahko pri razgradnji odpadnih elementov na deponiji pojavijo dodatne časovne zakasnitve pri pridobivanju energije, kar zajemajo koeficienti $e^{-s(\Delta_{ij}^{44})^{\hat{E}}}$ znotraj podmatrike $\tilde{\mathbf{E}}_{44}^G(s)$.

3.1.8 Razširjeni numerični primer z vključitvijo tehnoloških parametrov posamične celice aktivnosti

Numeričnemu primeru iz podpoglavja 3.1.6, ki vključuje časovne zakasnitve, dodamo še tehnološke parametre posamičnih lokacij celic aktivnosti, ki nadomestijo predhodno determinirane vrednosti stopnje reciklaže. Vrednosti tehnoloških parametrov za posamične celice aktivnosti prikazujemo v Tabelah 6, 7 in 8.

Tabela 6: Tehnološki parametri posamičnih celic aktivnosti, ki služijo kot izhod iz proizvodnega podsistema v reciklažni podsistem

Reciklažno zaporedje		A	$\hat{L}$	γ	$\hat{P}$	δ	$\hat{E}$	φ
Element D	D, C	0,58	160.000	0,31	12.500	0,22	260.000	0,29
Element D	D, C, B	0,41	110.000	0,34	12.500	0,18	190.000	0,31
Element D	C, B	0,35	80.000	0,27	2.500	0,23	140.000	0,28
Element D	D, C, B, A	0,39	120.000	0,29	12.500	0,27	180.000	0,24
Element D	C, B, A	0,43	70.000	0,28	2.500	0,22	150.000	0,25
Element D	B, A	0,56	210.000	0,23	1.000	0,09	390.000	0,26
Element E	E, B	0,53	60.000	0,34	2.500	0,23	160.000	0,19
Element E	E, A	0,54	220.000	0,24	1.000	0,23	170.000	0,23
Element E	E, B, A	0,46	180.000	0,21	2.500	0,28	310.000	0,24
Element E	B, A	0,57	230.000	0,21	1.000	0,14	410.000	0,25

Tabela 7: Tehnološki parametri posamičnih celic aktivnosti, ki služijo kot izhod iz distribucijskega podsistema v reciklažni podsistem

Reciklažno zaporedje		A	$\hat{L}$	γ	$\hat{P}$	δ	$\hat{E}$	φ
Element D	D, C, B, A	0,38	120.000	0,29	12.500	0,27	180.000	0,24
Element D	C, B, A	0,41	70.000	0,28	2.500	0,22	150.000	0,25
Element D	B, A	0,52	210.000	0,23	1.000	0,09	390.000	0,26
Element E	E, A	0,51	220.000	0,24	1.000	0,23	170.000	0,23
Element E	E, B, A	0,44	180.000	0,21	2.500	0,28	310.000	0,24
Element E	B, A	0,54	230.000	0,21	1.000	0,14	410.000	0,25

Tabela 8: Tehnološki parametri posamičnih celic aktivnosti, ki služijo kot izhod iz potrošnega podsistema v reciklažni podsistem

Reciklažno zaporedje		A	$\hat{L}$	γ	$\hat{P}$	δ	$\hat{E}$	φ
Element D	D, C, B, A	0,37	120.000	0,29	12.500	0,27	180.000	0,24
Element D	C, B, A	0,39	70.000	0,28	2.500	0,22	150.000	0,25
Element D	B, A	0,51	210.000	0,23	1.000	0,09	390.000	0,26
Element E	E, A	0,49	220.000	0,24	1.000	0,23	170.000	0,23
Element E	E, B, A	0,43	180.000	0,21	2.500	0,28	310.000	0,24
Element E	B, A	0,53	230.000	0,21	1.000	0,14	410.000	0,25

Na podlagi parametrov posamičnih celic aktivnosti (Tabele 6, 7 in 8) z uporabo enačbe (91) izračunamo končne stopnje reciklaže α_{kl} za osnovna elementa D in E (Tabela 9).

Tabela 9: Izračun končnih stopenj reciklaže α_{k4l3} , α_{k5l2} in α_{k5l1} elementov D in E z upoštevanjem proizvodne funkcije pri izvajanju reciklažnih aktivnosti

n'	$l3$	$l2$	$l1$	2	3	Vsota
α_{k4l3}	0,1128	0,0316	0,0059	0,0041	0,0148	0,1693
α_{k5l2}		0,1053	0,0352	0,0255	0,0980	0,2640
α_{k5l1}			0,1617	0,1221	0,4694	0,7532

Za ustrezno obravnavo stroška delovne sile znotraj reciklažnih procesov moramo določiti še vektor cen delovne sile $\mathbf{c}_L$:

$$\mathbf{c}_L = [0,03 \quad 0,04 \quad 0,05 \quad 0,07 \quad 0,08 \quad 0,01 \quad 0,02 \quad 0,01] \quad (142)$$

Vrednosti vhodne energije ε_{ij}^H in izhodne energije ε_{ji}^G znotraj posamične celice aktivnosti so zajete znotraj generaliziranih energetskega matrik $\tilde{\mathbf{E}}^H(\rho)$ in $\tilde{\mathbf{E}}^G(\rho)$, ki ju prikazujemo v nadaljevanju. Predpostavljamo, da se v proizvodnem procesu uporablja zgolj električna energija, zato so transportne časovne zakasnitve v tem primeru vedno enake 0.

$$\tilde{\mathbf{E}}^H(\rho) = \tilde{\mathbf{E}}^{H^r}(\rho) \tilde{\mathbf{\tau}}^{pr}(\rho) = \quad (143)$$

$$= \begin{bmatrix} 1,2 * 2e^{(0+3)\rho} & & & & 3,7 * 0,2e^{5\rho} & & & \\ & 1,3 * 4e^{(0+2)\rho} & & & & 2,9 * 0,2e^{3\rho} & & \\ & & 1,1 * 2e^{(0+1)\rho} & & & & 2,7 * 0,2e^{4\rho} & \\ 1,4 * 2e^{(0+3)\rho} & 1,7 * 2e^{(0+2)\rho} & & & & & & \\ \hline & & & & 2,2 * 0,16e^{6\rho} & & & \\ & & & & 2,3 * 0,64e^{7\rho} & & & \\ \hline & & & & & & & \end{bmatrix}$$

Energijo pridobivamo v postopku reciklaže in v postopku razkroja oziroma sežiga odpadnih elementov. Posledično imata podmatriki $\tilde{\mathbf{E}}_{14}^G(s)$ in $\tilde{\mathbf{E}}_{44}^G(s)$ pozitiven doprinos k skupni neto sedanji vrednosti celotnega sistema. S postopkom reciklaže energije pridobimo iz obnovljene

enote energije znotraj posamične celice aktivnosti ε_{ji}^G denarnih enot sredstev. Pri pridobivanju energije iz odpadnih elementov pa se pojavijo dodatne časovne zakasnitve, ki jih v podmatriko $\bar{\mathbf{E}}_{44}(\mathbf{s})$ vključimo s členi $e^{-2\rho}$, $e^{-4\rho}$ in $e^{-3\rho}$.

$$\tilde{\mathbf{E}}^G(\rho) = \tilde{\Delta}^{pr}(\rho) \tilde{\mathbf{E}}^{G^{tr+\dot{E}}}(\rho) = \quad (144)$$

A graph showing the function $y = 0.9 * 1.716e^{(-4-8)\rho} e^{-3\rho}$. The x-axis is labeled ρ and ranges from 0 to 10. The y-axis is labeled y and ranges from 0 to 1. The function is a decreasing exponential curve starting at $(0, 1.716)$ and approaching the x-axis as ρ increases. The curve is labeled with the equation $y = 0.9 * 1.716e^{(-4-8)\rho} e^{-3\rho}$.

Skupno neto sedanjo vrednost za numerični primer izračunamo z upoštevanjem tehnoloških parametrov posamičnih celic aktivnosti ter stroškov delovne sile in energije:

$$\begin{aligned} \text{NSV} &= \mathbf{p} \left(\tilde{\mathbf{G}}(\rho) - \tilde{\mathbf{H}}(\rho) \right) \tilde{\mathbf{P}}(\rho) - \hat{\mathbf{K}} \tilde{\mathbf{v}}(\rho) - \mathbf{U}^T \left(\tilde{\Pi}_G(\rho) + \tilde{\Pi}_H(\rho) \right) \tilde{\mathbf{P}}(\rho) - \\ &\quad - \mathbf{c}_L \hat{\mathbf{L}} \tilde{\mathbf{v}}(\rho) - \mathbf{U}^T \left(\tilde{\mathbf{E}}_H(\rho) - \tilde{\mathbf{E}}_G(\rho) \right) \tilde{\mathbf{P}}(\rho) = \\ &= 2.076.084,10 - 101.950,19 - 2.140.360,58 - 183.566,93 - 148.333,93 = \\ &= -498.127,52 \end{aligned} \quad (145)$$

Iz računa lahko razberemo, da je neto sedanja vrednost negativna, zato obstoječi sistem ustvarja izgubo. Na podlagi relativno visokih transportnih stroškov lahko sklepamo, da izbira lokacije reciklažnih celic aktivnosti ni optimalna, kar podrobneje analiziramo v podpoglavju 3.1.6. Neto sedanjo vrednost sistema lahko zvišamo tudi z izbiro reciklažnih celic aktivnosti, ki imajo naprednejšo tehnologijo, s čimer zvišamo stopnje reciklaže in posledično neto sedanjo vrednost prihodkov. Pri tem pa ne smemo zanemariti vpliva cene ter potrebne količine delovne sile in energije znotraj posamičnega okolja.

Podrobnejšo analizo vpliva spremembe različnih dejavnikov na obnašanje sistema kot celote obravnavamo s simulacijami v podpoglavju 3.4.

3.2 VKLJUČITEV MONTAŽNEGA SISTEMA NA NIVOJU PROIZVODNEGA PODSISTEMA

Neto sedanjo vrednost celotne oskrbovalne verige lahko dvignemo z vpeljavo navideznih tokov. S podrobnim proučevanjem procesov oskrbovalne verige lahko poiščemo takšne celice aktivnosti, v katerih je smiselno materialne, informacijske in denarne tokove optimizirati z vpeljavo navideznih tokov. Navidezne tokove lahko vključimo tudi v razširjeni model teorije planiranja materialnih potreb za vse prehode med poljubnimi celicami aktivnosti znotraj štirih podsistemov.

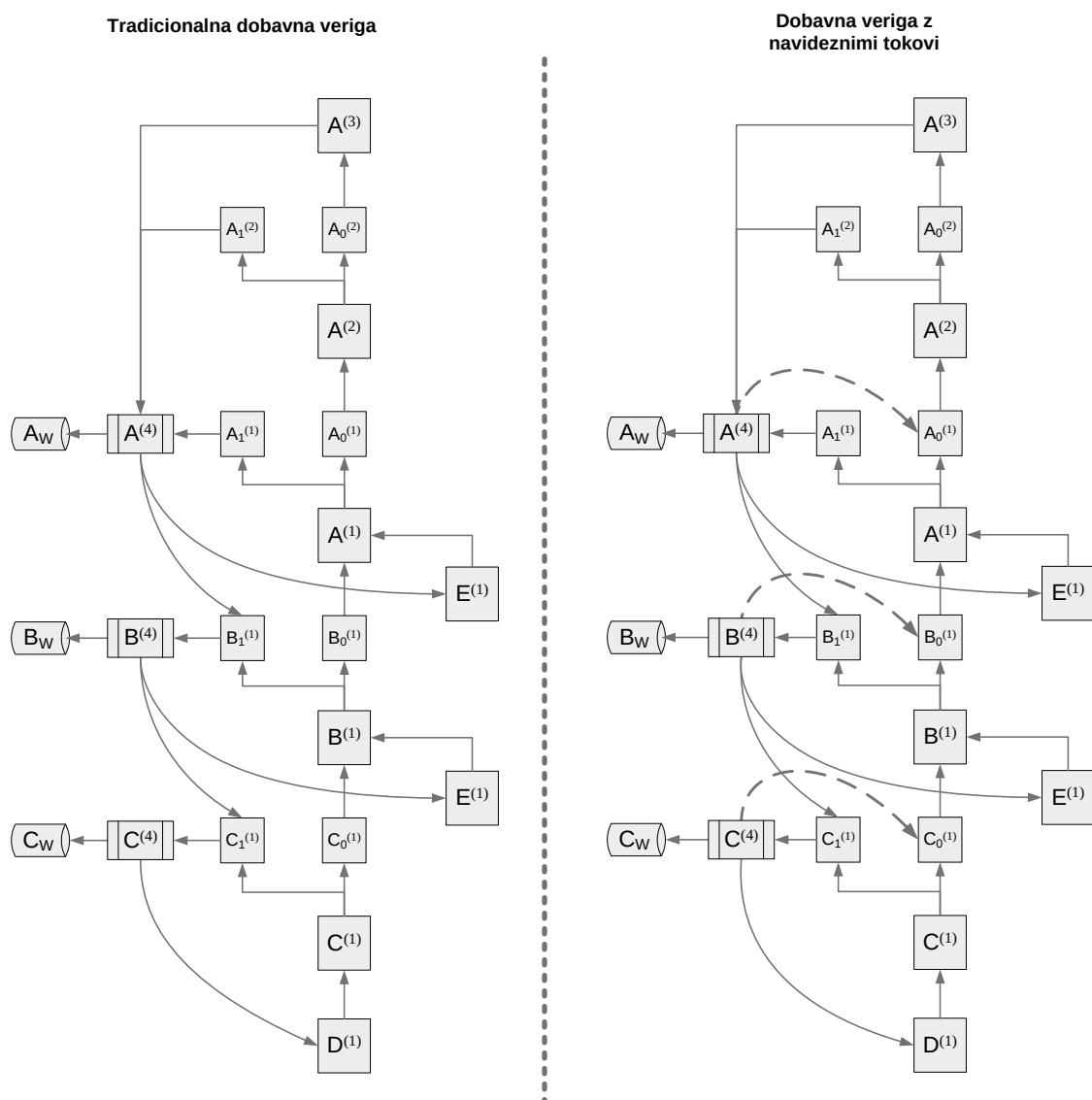
Navidezne oskrbovalne verige lažje razumemo z opazovanjem aktivnosti potrošnikov (končnih kupcev), prodajalcev, dobaviteljev in proizvajalcev. Znotraj tradicionalnih oskrbovalnih verig končni izdelek distribuiramo preko dobaviteljev do prodajalcev, ki ga nato prodajo končnemu kupcu. Pri tem teče informacijski tok skozi vse celice aktivnosti, vendar v obratni smeri: od končnega potrošnika do prodajalca in nadalje do dobavitelja in proizvajalca.

Oskrbovalne verige z navideznimi tokovi ta koncept optimizirajo tako, da materialni tok preskoči posamične celice aktivnosti, pri čemer se informacijski tok ne spremeni. S takšnim pristopom praviloma skrajšamo trajanje cikla (skrajšamo časovne zakasnitve) in znižamo distribucijske stroške, s čimer povečamo zadovoljstvo končnega kupca in hkrati dvignemo neto sedanjo vrednost oskrbovalne verige kot celote.

Prodajalci znotraj tradicionalnih oskrbovalnih verig vzdržujejo nivo zalog v lastnih oziroma najetih skladiščih in prodajalnah. Te zaloge služijo zadovoljevanju povpraševanja kupcev, saj z njimi realizirajo njihova naročila. Za razliko od tradicionalnih oskrbovalnih verig pa znotraj navideznih oskrbovalnih verig prodajalci ne vzdržujejo lastnih zalog. Končni potrošniki še vedno izvajajo naročila pri prodajalcih, s čimer se ohrani informacijski tok, prodajalci pa namesto neposredne izročitve končnega izdelka sprožijo naročilo pri dobavitelju, ki izdelek skladišči in ga ob naročilu dobavi. Fizični (materialni) tok torej zaobide prodajalca in poteka neposredno med dobaviteljem in kupcem, medtem ko informacijski tok ohranja celotno pot kot pri tradicionalnih oskrbovalnih verigah. Tudi finančni tok v navideznih oskrbovalnih verigah ohranja celotno pot. Prodajalec je prejemnik prihodkov, kar prispeva k neto sedanji vrednosti sistema in hkrati znižuje njegove stroške poslovanja.

Idejo navideznih tokov lahko v prenesenem pomenu uporabimo tudi pri proučevanju vpliva okoljske komponente znotraj celotne oskrbovalne verige, kar prikazujemo na Sliki 17. Znotraj reciklažnega podsistema lahko poljubno celico aktivnosti s kateregakoli nivoja obravnavamo kot prodajalca recikliranih proizvodov, ki te proizvode posreduje nazaj na višje ležeče nivoje proizvodnega podsistema, kjer nadaljujejo svoj cikel.

Slika 17: Prikaz tradicionalne oskrbovalne verige in njena nadgradnja z navideznimi tokovi, kjer reciklirane elemente z višje ležečih celic aktivnosti reciklažnega podsistema vračamo neposredno na višje ležeče nivoje montažnega sistema



Tradicionálna oskrbovalna veriga, ki jo prikazujemo na levi strani Slike 17, vsebuje model štirih podsistemov, v katerem temelji proizvodnja na kosovnici, reciklaža pa na povratni kosovnici. Gre za pristop, ki ga uporabljamo v predhodnih poglavjih te doktorske disertacije. Končni proizvod A sestavljamo na več različnih nivojih kosovnice, nato pa vstopi v podsistem distribucije (označujemo ga z indeksom 2) in potrošnje (označujemo ga z indeksom 3). V podsistem reciklaže (označujemo ga z indeksom 4) pa lahko preidemo iz poljubne celice aktivnosti. Ko element vstopi v reciklažo, ga v celoti razgradimo do njegovih osnovnih gradnikov.

Z vidika optimizacije proizvodnega podsistema (označujemo ga z indeksom 1) lahko tak sistem kot celoto racionaliziramo z vpeljavo navideznih tokov, kar prikazujemo na desni

polovici Slike 17. Z vključitvijo navideznih tokov, pri katerih materialni tok preskoči posamične celice aktivnosti, popolna demontaža ni več pogoj za ponovno uporabo elementa v naslednjem ciklu proizvodnega podsistema. Sistem tako postane fleksibilnejši, hkrati pa se poveča dinamika izmenjave elementov med proizvodnim in reciklažnim podsistemom, kar ima pozitivne učinke na zniževanje količine odpadkov in trajnostni razvoj gospodarstva.

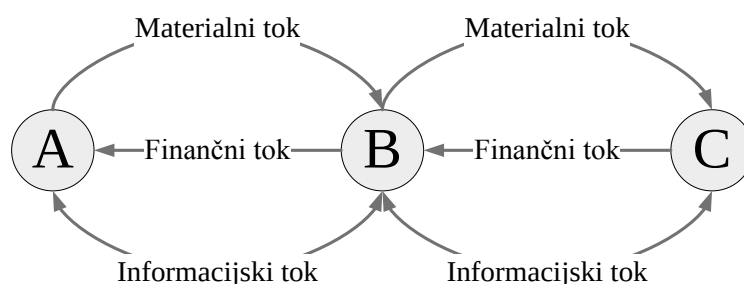
V podpoglavju 3.2 torej raziskujemo možnosti vključitve navideznih tokov v proizvodni podsistem in prikazujemo pozitivne vplive vpeljave navideznih tokov na neto sedanjo vrednost sistema kot celote.

Razširitev modela planiranja materialnih potreb v podpoglavju 3.1 temelji na predpostavki zaprtega sistema, v katerem ne prihaja do izgub elementov. V nadaljevanju to predpostavko ovržemo in raziskujemo možnosti obravnave izgub. Izgube sistema so v največji meri prisotne znotraj montažnega sistema kot stranski produkt proizvodnje (elementi, ki onesnažujejo okolje v obliki izpuhov, onesnaženih voda, neustrezno odloženih odpadkov ipd.). Pokažemo, da je obravnavanje takšnih izgub v razširjeni teoriji planiranja materialnih potreb mogoče ustrezno vključiti v model in opazovati njihov vpliv na celotno ekonomsko-okoljsko ravnotežje sistema.

3.2.1 Navidezni tokovi znotraj oskrbovalne verige proizvodnega podsistema

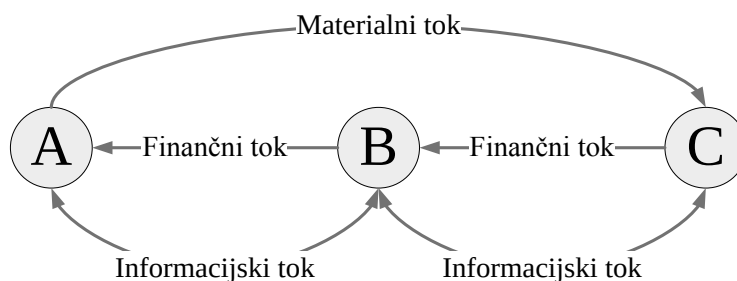
Znotraj tradicionalnih oskrbovalnih verig potekajo informacijski, materialni in finančni tokovi izključno med dvema zaporednima celicama aktivnosti v mreži. V tradicionalnih oskrbovalnih verigah namreč navzkrižni tokovi niso dovoljeni. To prikazujemo na Sliki 18 s tremi zaporednimi celicami aktivnosti A, B in C: materialni, finančni in informacijski tokovi tečejo izključno med zaporednima celicama aktivnosti A in B oziroma B in C. V takšnih razmerah lahko uporabimo klasičen pristop input-output modela razširjene teorije planiranja materialnih potreb, pri katerem s pomočjo vključitve časovnih zakasnitev na podlagi izračuna neto sedanje vrednosti sprejemamo ustrezne odločitve (podpoglavje 3.1 te doktorske disertacije).

Slika 18: Prikaz informacijskega, materialnega in finančnega toka na primeru treh celic aktivnosti tradicionalne oskrbovalne verige



V sodobnih oskrbovalnih verigah, v katerih se organizacije ponavadi soočajo z visoko stopnjo konkurence, se pojavljajo nenehne težnje po skrajševanju dobavnih rokov in zniževanju stroškov. Tradicionalni pristop je v takšnih primerih neučinkovit in rigiden. Zvišanje neto sedanje vrednosti takšnega sistema lahko dosežemo z vpeljavo navideznih organizacij (L. Bogataj et al., 2009b). Za razliko od klasičnega pristopa, pri katerem tokovi vedno potekajo med dvema sosednjima celicama aktivnosti, lahko pri navideznih oskrbovalnih verigah materialni tok zaobide posamične celice aktivnosti, pri čemer finančni in informacijski tok ohranita celotno pot (Slika 19).

Slika 19: Prikaz informacijskega, materialnega in finančnega toka na primeru treh celic aktivnosti oskrbovalne verige z navideznimi tokovi

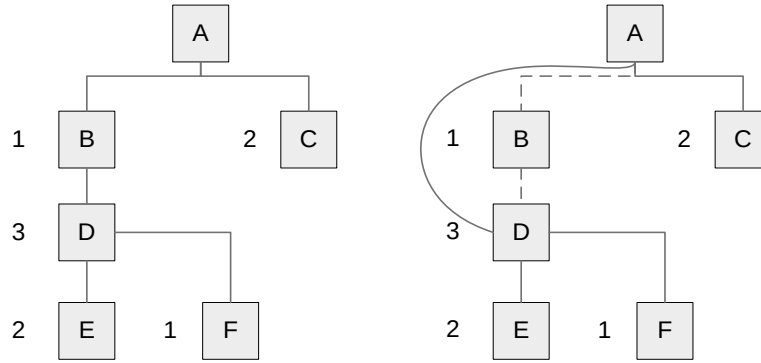


Z vidika vhodno-izhodnih matrik opišemo prehod med tradicionalno in navidezno oskrbovalno verigo z združitvijo koeficientov (L. Bogataj et al., 2009b, str. 47-55). Kadar se navidezna organizacija pojavi v celici aktivnosti l izhodne matrike $\mathbf{G}$, s koeficientom $g_{kj}^1 e^{-s\Delta_{kj}^{tr}} \in \check{\mathbf{G}}^1$ nadomestimo predhodna koeficienta $g_{kl} e^{-s\Delta_{kl}^{tr}} \in \check{\mathbf{G}}$ in $g_{lj} e^{-s\Delta_{lj}^{tr}} \in \check{\mathbf{G}}$. Podobno v primeru pojava navidezne organizacije k v vhodni matriki $\mathbf{H}$ koeficient $h_{ij}^1 e^{s\tau_{ij}^{tr}} \in \check{\mathbf{H}}^1$ nadomesti predhodna koeficienta $h_{ik} e^{s\tau_{ik}^{tr}} \in \check{\mathbf{H}}$ in $h_{kj} e^{s\tau_{kj}^{tr}} \in \check{\mathbf{H}}$. Materialna tokova $g_{kl} e^{-s\Delta_{kl}^{tr}} \rightarrow g_{lj} e^{-s\Delta_{lj}^{tr}}$ in $h_{ik} e^{s\tau_{ik}^{tr}} \rightarrow h_{kj} e^{s\tau_{kj}^{tr}}$ torej povsem izgineta, ohranita pa se finančni in informacijski tok. Ta zamenjava ima pozitiven vpliv na skrajšanje časovnih zakasnitev in znižanje transportnih stroškov, zajetih v matrikah $\mathbf{\Pi}_G$ in $\mathbf{\Pi}_H$, ki ju po izgubi koeficientov g_{kl} , g_{lj} , h_{ik} in h_{kj} zapišemo kot $\mathbf{\Pi}_G^1$ in $\mathbf{\Pi}_H^1$. Z vpeljavo navideznih organizacij lahko torej v večini primerov pričakujemo pozitivno razliko v neto sedanji vrednosti ($\text{DNSV} = \text{NSV}^1 - \text{NSV}$), s čimer postane oskrbovalna veriga konkurenčnejša.

Vpliv vpeljave navideznih organizacij v tradicionalno oskrbovalno verigo teorije planiranja materialnih potreb lahko opazujemo na enostavnem numeričnem primeru. S kosovnico na levi strani Slike 20 predstavljamo primer tradicionalne verige, na desni strani pa primer navidezne oskrbovalne verige. Celica aktivnosti D zahteva 2 enoti elementa E in 1 enoto elementa F. Celica aktivnosti B zahteva 3 enote elementa D. Končni izdelek A sestavimo iz 1 enote

elementa B in 2 enot elementa C. Na desni polovici Slike 20 v primeru prehoda k navidezni oskrbovalni verigi materialni tok preskoči celico aktivnosti B. Namesto tega poteka transport elementov D neposredno v celico aktivnosti A, pri čemer se ohranita finančni in informacijski tok na relacijah $A \rightarrow B$ in $B \rightarrow D$. V nadaljevanju na podlagi tega primera prikazujemo vpliv takšnega preskoka na neto sedanjo vrednost.

Slika 20: Primer kosovnice za tradicionalno in navidezno oskrbovalno verigo



Vir: L. Bogataj, M.D. Kisperska, M. Bogataj in D. Kovačič, *The evaluation of virtual activities in global supply chains*, 2009, str. 50.

V skladu s kosovnico (Slika 20) in določitvijo numeričnih vrednosti za transportne časovne zakasnitve τ^{tr} in proizvodne časovne zakasnitve τ^{pr} zapišemo generalizirano vhodno matriko $\tilde{\mathbf{H}}(\rho)$ na naslednji način:

$$\tilde{\mathbf{H}}(\rho) = \tilde{\mathbf{H}}^{tr}(\rho) \tilde{\mathbf{\tau}}^{pr}(\rho) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1e^{4\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2e^{3\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3e^{2\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2e^{3\rho} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1e^{1\rho} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{3\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{4\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{3\rho} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{2\rho} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{2\rho} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{1\rho} \end{bmatrix} \quad (146)$$

Generalizirano izhodno matriko $\tilde{\mathbf{G}}(\rho)$, ki na nivoju proizvodnega podsistema vključuje izključno tehnološke koeficiente g_{kl} z vrednostjo $g_{kl} = 1$ in ki ji dodamo numerične vrednosti za časovne zakasnitve Δ^{tr} in Δ^{pr} , zapišemo v naslednji obliki:

$$\tilde{\mathbf{G}}(\rho) = \tilde{\Delta}^{pr}(\rho) \tilde{\mathbf{G}}^{tr}(\rho) = \quad (147)$$

$$= \begin{bmatrix} e^{-8\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-6\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-2\rho} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-4\rho} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-4\rho} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-2\rho} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1e^{-4\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1e^{-2\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1e^{-2\rho} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1e^{-2\rho} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1e^{-1\rho} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1e^{-1\rho} \end{bmatrix}$$

Numerične vrednosti za začetne (inicialne) čase t in dolžine posamičnih ciklov T , ki jih zajamemo v $\tilde{\mathbf{t}}(\rho)$ in $\tilde{\mathbf{T}}(\rho)$, so:

$$\tilde{\mathbf{t}}(\rho) = \begin{bmatrix} e^{-22\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-18\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-14\rho} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-10\rho} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-6\rho} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-2\rho} \end{bmatrix} \quad (148)$$

$$\tilde{\mathbf{T}}(\rho) = \begin{bmatrix} (1-e^{-15\rho})^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (1-e^{-13\rho})^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (1-e^{-10\rho})^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1-e^{-13\rho})^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1-e^{-10\rho})^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1-e^{-13\rho})^{-1} \end{bmatrix} \quad (149)$$

Na podlagi vrednosti konstant vektorja $\hat{\mathbf{P}}$ za posamične celice aktivnosti znotraj posamičnega cikla izračunamo proizvodni plan $\tilde{\mathbf{P}}(\rho)$:

$$\hat{\mathbf{P}} = \begin{bmatrix} 100 \\ 100 \\ 200 \\ 300 \\ 600 \\ 300 \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{P}}(\rho) = \tilde{\mathbf{t}}(\rho)\tilde{\mathbf{T}}(\rho)\hat{\mathbf{P}} = \begin{bmatrix} 38,42 \\ 54,41 \\ 168,45 \\ 274,55 \\ 849,94 \\ 461,80 \end{bmatrix} \quad (150)$$

Za dokončno definicijo matrike transportnih stroškov moramo definirati transportne stroške med posamičnima celicama aktivnosti i in j , ki jih opisujemo s koeficientom b_{ij} . Matrika vhodnih transportnih stroškov za obravnavani numerični primer z vključenimi numeričnimi vrednostmi za posamične transportne stroške b_{ij} je tako:

$$\tilde{\mathbf{\Pi}}_H(\rho) = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \vdots & & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ h_{i1}b_{i1}\tau_{i1} & \cdots & h_{ij}b_{ij}\tau_{ij} & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m1}b_{m1}\tau_{m1} & \cdots & h_{mj}b_{mj}\tau_{mj} & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \end{bmatrix} \tilde{\tau}^{pr}(\rho) = \quad (151)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1*3*4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2*2*3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3*6*2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2*1*3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1*3*1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{3\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{4\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{3\rho} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{2\rho} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{2\rho} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{1\rho} \end{bmatrix}$$

Matrika izhodnih transportnih stroškov za obravnavani numerični primer z vključenimi vrednostmi posamičnih transportnih stroškov b_{kj} med poljubnima vozlova k in j je:

$$\tilde{\mathbf{\Pi}}_G(\rho) = \tilde{\Delta}^{pr}(\rho) \begin{bmatrix} g_{11}b_{11}\tau_{11} & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & g_{kj}b_{kj}\tau_{kj} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & g_{mn}b_{mn}\tau_{mn} \end{bmatrix} = \quad (152)$$

$$= \begin{bmatrix} e^{-8\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-6\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-2\rho} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-4\rho} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-4\rho} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-2\rho} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1*3*4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1*2*2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1*1*2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1*2*2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1*2*1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1*3*1 \end{bmatrix}$$

Vrednosti cenovnega vektorja po posamičnih celicah aktivnosti definiramo kot:

$$\mathbf{p} = [2.000 \quad 750 \quad 600 \quad 250 \quad 30 \quad 150] \quad (153)$$

Pri tem je zvezna obrestna mera $\rho = 0,065$. Vrednosti vzpostavitev stroškov po posamičnih celicah aktivnosti so:

$$\hat{\mathbf{K}} = [200 \ 180 \ 210 \ 195 \ 175 \ 215] \quad (154)$$

Čase posamičnih vzpostavitev aktivnosti $\tilde{\mathbf{v}}(s)$ pa izračunamo kot:

$$\tilde{\mathbf{v}}(s) = \begin{bmatrix} e^{-\rho t_1} / (1 - e^{-\rho T_1}) \\ \vdots \\ e^{-\rho t_6} / (1 - e^{-\rho T_6}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,384 \\ 0,544 \\ 0,842 \\ 0,915 \\ 1,417 \\ 1,539 \end{bmatrix} \quad (155)$$

Neto sedanjo vrednost proizvodnje ob predpostavki tradicionalne oskrbovalne verige s parametri za numerični primer izračunamo na naslednji način:

$$\text{NSV} = \mathbf{p}(\tilde{\mathbf{G}}(\rho) - \tilde{\mathbf{H}}(\rho))\tilde{\mathbf{P}}(\rho) - \mathbf{U}^T(\tilde{\mathbf{\Pi}}_G(\rho) + \tilde{\mathbf{\Pi}}_H(\rho))\tilde{\mathbf{P}}(\rho) - \hat{\mathbf{K}}\tilde{\mathbf{v}}(\rho) = \quad (156)$$

$$= [2.000 \ 750 \ 600 \ 250 \ 30 \ 150] \begin{bmatrix} 17,61 \\ -28,22 \\ 16,37 \\ -55,19 \\ -145,86 \\ 46,32 \end{bmatrix} - [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1] \begin{bmatrix} 274,13 \\ 707,72 \\ 856,18 \\ 3.387,05 \\ 7.118,34 \\ 2.794,23 \end{bmatrix} -$$

$$- [200 \ 180 \ 210 \ 195 \ 175 \ 215] \begin{bmatrix} 0,384 \\ 0,544 \\ 0,842 \\ 0,915 \\ 1,417 \\ 1,539 \end{bmatrix} = 12.661,00 - 15.137,65 - 1.108,95 = -3.585,60$$

Skupna neto sedanja vrednost proizvodnje je sestavljena iz treh komponent:

- 1) neto sedanje vrednosti proizvodnje z vrednostjo 12.661,00,
- 2) neto sedanje vrednosti transportnih stroškov z vrednostjo 15.137,65 in
- 3) neto sedanje vrednosti vzpostavitev stroškov z vrednostjo 1.108,95.

Transportni in vzpostavitevni stroški skupaj presegajo vrednost proizvodnje, kar povzroči negativno skupno neto sedanjo vrednost v višini – 3.585,60. Celotni proizvodni sistem torej ustvarja izgubo in v obstoječi obliki ni ekonomsko upravičen.

Ekonomsko upravičenost proizvodnega podsistema pa lahko dosežemo z optimizacijo oskrbovalne verige. Za navidezno oskrbovalno verigo z desne strani Slike 20 zapišemo prilagojeno generalizirano vhodno matriko $\check{\mathbf{H}}^1(\rho)$, pri čemer se spremenijo postavitve koeficientov h_{ij} ter časovne zakasnitve τ^{tr} in τ^{pr} med tistim parom celic aktivnosti i in j , pri katerih postane vmesna celica aktivnosti k navidezna:

$$\check{\mathbf{H}}^1(\rho) = \check{\mathbf{H}}^{tr1}(\rho) \check{\mathbf{T}}^{pr1}(\rho) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2e^{3\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3e^{4\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2e^{3\rho} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1e^{1\rho} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{3\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{4\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{3\rho} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{2\rho} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{2\rho} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{1\rho} \end{bmatrix} \quad (157)$$

Prehod v navidezno organizacijo, kot ga prikazujemo na Sliki 20 in znotraj generalizirane vhodne matrike $\check{\mathbf{H}}^1(\rho)$, povzroči izgubo tehnoloških koeficientov h_{21} in h_{42} , ki pripadata tokovoma $D \rightarrow B$ in $B \rightarrow A$. Materialni tok namreč teče neposredno na relaciji $D \rightarrow A$, kar opisuje novo vpeljani tehnološki koeficient h_{41} v generalizirani vhodni matriki $\check{\mathbf{H}}^1(\rho)$. Rezultat prehoda je tudi izginotje časovnih zakasnitev τ_{21}^{tr} in τ_{42}^{tr} . Nadomestimo ju s časovno zakasnitvijo τ_{41}^{tr} , ki ustreza prehodu na relaciji $D \rightarrow A$.

Generalizirana izhodna matrika $\check{\mathbf{G}}^1(\rho)$ pri proizvodnih časovnih zakasnitvah $\check{\mathbf{\Delta}}^{pr1}(\rho)$ izgubi časovno zakasnitev, ki se nanaša na celico aktivnosti B, kar opisuje tehnološki koeficient g_{22} :

$$\check{\mathbf{G}}^1(\rho) = \check{\mathbf{\Delta}}^{pr1}(\rho) \check{\mathbf{G}}^{tr1}(\rho) = \begin{bmatrix} e^{-8\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-6\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-2\rho} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-4\rho} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-4\rho} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-2\rho} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1e^{-4\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1e^{-2\rho} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1e^{-2\rho} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1e^{-1\rho} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1e^{-1\rho} \end{bmatrix} \quad (158)$$

Ker izpustimo materialni tok skozi celico aktivnosti B in ga nadomestimo z neposrednim prehodom iz celice D v celico A, se spremeni tudi proizvodni plan $\check{\mathbf{P}}(\rho)$. Z izločitvijo celice aktivnosti B postane proizvodni plan $\check{\mathbf{P}}^1(\rho)$:

$$\hat{\mathbf{P}}^1 = \begin{bmatrix} 100 \\ 0 \\ 200 \\ 300 \\ 600 \\ 300 \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{P}}^1(\rho) = \tilde{\mathbf{t}}(\rho)\tilde{\mathbf{T}}(\rho)\hat{\mathbf{P}}^1 = \begin{bmatrix} 38,42 \\ 0,00 \\ 168,45 \\ 274,55 \\ 849,94 \\ 461,80 \end{bmatrix} \quad (159)$$

S spremembo materialnih tokov se posledično spremeni tudi struktura transportnih matrik $\mathbf{\Pi}_H$ in $\mathbf{\Pi}_G$. Transportni stroški na relaciji $D \rightarrow B$ in $B \rightarrow A$ izginejo, pojavijo pa se transportni stroški na relaciji $D \rightarrow A$. V večini primerov lahko pričakujemo, da bo nastanek navidezne celice aktivnosti skrajšal transportne poti oziroma znižal transportne stroške. Kljub temu pa se lahko v določenih primerih vseeno zgodi, da je racionalneje ohraniti materialne tokove v obstoječi, tradicionalni obliki. Takšno situacijo lahko razložimo na primeru globalne oskrbovalne verige, v kateri se celica aktivnosti B nahaja na lokaciji, ki ima dobro vzpostavljene trgovinske odnose z državama, v katerih se nahajata celici aktivnosti A in D. Kadar so stroški carine pri prehodu $D \rightarrow A$ visoki, carinski postopki pa zapleteni (kar posledično povzroči tudi daljše časovne zakasnitve), je v primeru nizkih carin in krajših časovnih zakasnitev pri prehodih $D \rightarrow B$ in $B \rightarrow A$ racionalneje ohraniti obstoječi materialni tok skozi celico aktivnosti B (špekulativna transakcija).

Nove vrednosti transportnih stroškov in časovnih zakasnitev po transformaciji celice aktivnosti B v navidezno organizacijo lahko predstavimo z vhodno matriko transportnih stroškov $\tilde{\mathbf{\Pi}}_H^1(\rho)$:

$$\tilde{\mathbf{\Pi}}_H^1(\rho) = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \vdots & & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ h_{i1}^1 b_{i1}^1 \tau_{i1}^1 & \dots & h_{ij}^1 b_{ij}^1 \tau_{ij}^1 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m1}^1 b_{m1}^1 \tau_{m1}^1 & \dots & h_{mj}^1 b_{mj}^1 \tau_{mj}^1 & \dots & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} \tilde{\boldsymbol{\tau}}^{pr1}(\rho) = \quad (160)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2*2*3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3*5*4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2*1*3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1*3*1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{3\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{4\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{3\rho} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{2\rho} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{2\rho} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{1\rho} \end{bmatrix}$$

Prav tako se spremeni izhodna matrika transportnih stroškov $\tilde{\Pi}_G^1(\rho)$:

$$\tilde{\Pi}_G^1(\rho) = \tilde{\Delta}^{pr1}(\rho) \begin{bmatrix} g_{11}^1 b_{11}^1 \tau_{11}^1 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & g_{kj}^1 b_{kj}^1 \tau_{kj}^1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & g_{mn}^1 b_{mn}^1 \tau_{mn}^1 \end{bmatrix} = \quad (161)$$

$$= \begin{bmatrix} e^{-8\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-6\rho} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-2\rho} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-4\rho} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-4\rho} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-2\rho} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1*3*4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1*1*2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1*2*2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1*2*1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1*3*1 \end{bmatrix}$$

Vzpostavitevni stroški znotraj celice aktivnosti B se praviloma znižajo, saj se znotraj nje ne izvajajo več nobene aktivnosti, povezane z materialnim tokom. Preostanek vzpostavitevni stroškov je povezan zgolj s finančnimi transakcijami in upravljanjem informacij. Vzpostavitevni strošek celice aktivnosti B pripada koeficient k_2 , z njegovim znižanjem pa postane vektor vzpostavitevni stroškov $\hat{\mathbf{K}}^1$:

$$\hat{\mathbf{K}}^1 = [200 \quad 50 \quad 210 \quad 195 \quad 175 \quad 215] \quad (162)$$

Neto sedanjo vrednost navidezne oskrbovalne verige NSV¹ proizvodnega podsistema izračunamo z uporabo novih parametrov:

$$\text{NSV}^1 = \mathbf{p}(\tilde{\mathbf{G}}^1(\rho) - \tilde{\mathbf{H}}^1(\rho))\tilde{\mathbf{P}}^1(\rho) - \mathbf{U}^T(\tilde{\Pi}_G^1(\rho) + \tilde{\Pi}_H^1(\rho))\tilde{\mathbf{P}}^1(\rho) - \hat{\mathbf{K}}\tilde{\mathbf{v}}(\rho) = \quad (163)$$

$$= [2.000 \quad 750 \quad 600 \quad 250 \quad 30 \quad 150] \begin{bmatrix} 17,61 \\ 0,00 \\ 16,37 \\ 4,19 \\ -145,86 \\ 46,32 \end{bmatrix} - [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1] \begin{bmatrix} 274,13 \\ 0,00 \\ 856,18 \\ 3.648,61 \\ 7.118,34 \\ 2.794,23 \end{bmatrix} -$$

$$-\begin{bmatrix} 200 & 50 & 210 & 195 & 175 & 215 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,384 \\ 0,544 \\ 0,842 \\ 0,915 \\ 1,417 \\ 1,539 \end{bmatrix} = 48.670,75 - 14.691,49 - 1.038,22 = 32.941,04$$

Parcialne neto sedanje vrednosti proizvodnega sistema po uvedbi navidezne organizacije so:

- 1) neto sedanja vrednost prihodkov v višini 48.670,75,
- 2) neto sedanja vrednost transportnih stroškov v višini 14.691,49 in
- 3) neto sedanja vrednost vzpostavitvenih stroškov v višini 1.038,22.

Razlika v neto sedanjih vrednosti tradicionalne in navidezne oskrbovalne verige DNSV je:

$$\begin{aligned} \text{DNSV} &= \text{NSV}^1 - \text{NSV} = \\ &= (48.670,75 - 12.661,00) - (14.691,49 - 15.137,65) - (1.038,22 - 1.108,95) = \\ &= 36.009,75 - (-446,16) - (-70,73) = \\ &= 36.526,64 \end{aligned} \quad (164)$$

Posledica transformacije celice aktivnosti B v navidezno organizacijo je povečanje neto sedanje vrednosti prihodkov (proizvodnje) v višini 36.009,75 zaradi skrajšanja časovnih zakasnitev. Krajša in cenejša pot zniža neto sedanjo vrednost transportnih stroškov za 446,16. Nižji vzpostavitveni stroški znotraj celice aktivnosti B pa povzročijo njihov upad v višini 70,73.

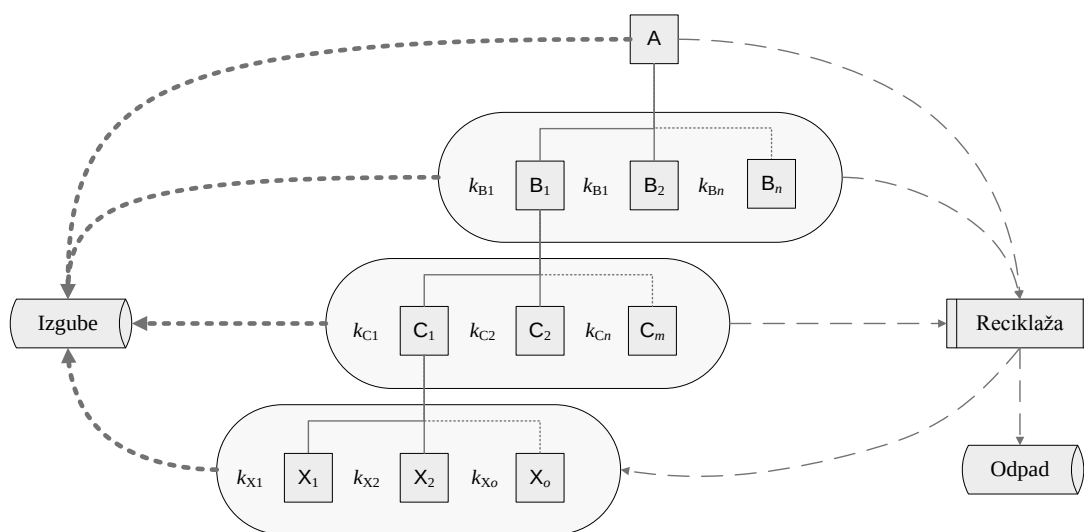
Končni rezultat je oskrbovalna veriga montažnega sistema s skupno neto sedanjo vrednostjo 36.526,64. Za razliko od tradicionalnega pristopa, pri katerem proizvodni sistem ni ekonomsko upravičen, smo s transformacijo v navidezno organizacijo dosegli racionalizacijo celotnega proizvodnega procesa v tolikšni meri, da ustvarja dobiček.

3.2.2 Izgube proizvodnje in njihova obravnava znotraj razširjenega modela

Izgube sistema predstavljajo dodaten pomemben dejavnik, ki ga je smiselno upoštevati pri določanju okoljskega ravnotežja. Izgube proizvodnega podsistema so lahko posledica različnih dejavnikov, kot je na primer požar v skladišču, izlitje vode, brodolom ladje ipd. Izgube so lahko tudi rezultat tehnoloških postopkov v procesu sestavljanja končnega proizvoda; določen del osnovnih gradnikov lahko tako na primer izstopi v obliki odpadnih voda ali izpustov v zrak (brušenje, izgorevanje ipd.).

Shematični prikaz proizvodnega podsistema (kosovnice), v katerem vsak element konča bodisi v reciklažnem podsistemu bodisi kot izguba sistema, prikazujemo na Sliki 21. Osnovni gradniki (surovine) $X_1, X_2, \dots, X_o$ so lahko rezultat reciklažnih aktivnosti ali pa vstopijo v proizvodnjo kot rezultat nabavnih aktivnosti na trgu surovin. Osnovni gradniki, vmesna proizvodnja (nivoja elementov $B_1, B_2, \dots, B_n$ in $C_1, C_2, \dots, C_m$) in končni proizvod A lahko izstopijo iz podsistema kot njegova izguba, kar prikazujemo s tokovi na levi strani Slike 21. Tokovi na desni strani slike pa prikazujejo tokove elementov v reciklažo in njihovo ponovno uporabo oziroma odpad.

Slika 21: Shematični prikaz izgub proizvodnega podsistema na vseh nivojih kosovnice



V nadaljevanju prikazujemo vhodno matriko $\mathbf{H}$ in izhodno matriko $\mathbf{G}$, kot sta znani iz klasične teorije planiranja materialnih potreb. Pri obravnavi izgub proizvodnje ohrani vhodna matrika $\mathbf{H}$ svojo že znano obliko, pri čemer so h_{ij} tehnološki koeficienti ter velja $i = 1, 2, \dots, m$ in $j = 1, 2, \dots, n$:

$$\mathbf{H} = \left[\begin{array}{ccccc|cccc} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ h_{21} & 0 & h_{23} & \cdots & h_{2n} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ h_{31} & h_{32} & 0 & \cdots & h_{3n} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n1} & h_{n2} & h_{n3} & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \hline h_{(n+1)1} & h_{(n+1)2} & h_{(n+1)3} & \cdots & h_{(n+1)n} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ h_{(n+2)1} & h_{(n+2)2} & h_{(n+2)3} & \cdots & h_{(n+2)n} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m1} & h_{m2} & h_{m3} & \cdots & h_{mn} & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{array} \right] \quad (165)$$

V klasični teoriji planiranja materialnih potreb vsebuje izhodna matrika $\mathbf{G}$ samo en neničelni koeficient $g_{11}=1$, ki pove, da je izhod proizvodnega procesa ena enota končnega proizvoda kot rezultat montažnega sistema na nivoju kosovnice. Kadar želimo znotraj proizvodnega podsistema upoštevati tudi izgube, postanejo neničelni vsi koeficienti g_{ij} , pri čemer velja $i = j$. Koeficienti $g_{22}, g_{33}, \dots, g_{mm}$ torej predstavljajo deleže izgub proizvodnje po posamičnih nivojih kosovnice:

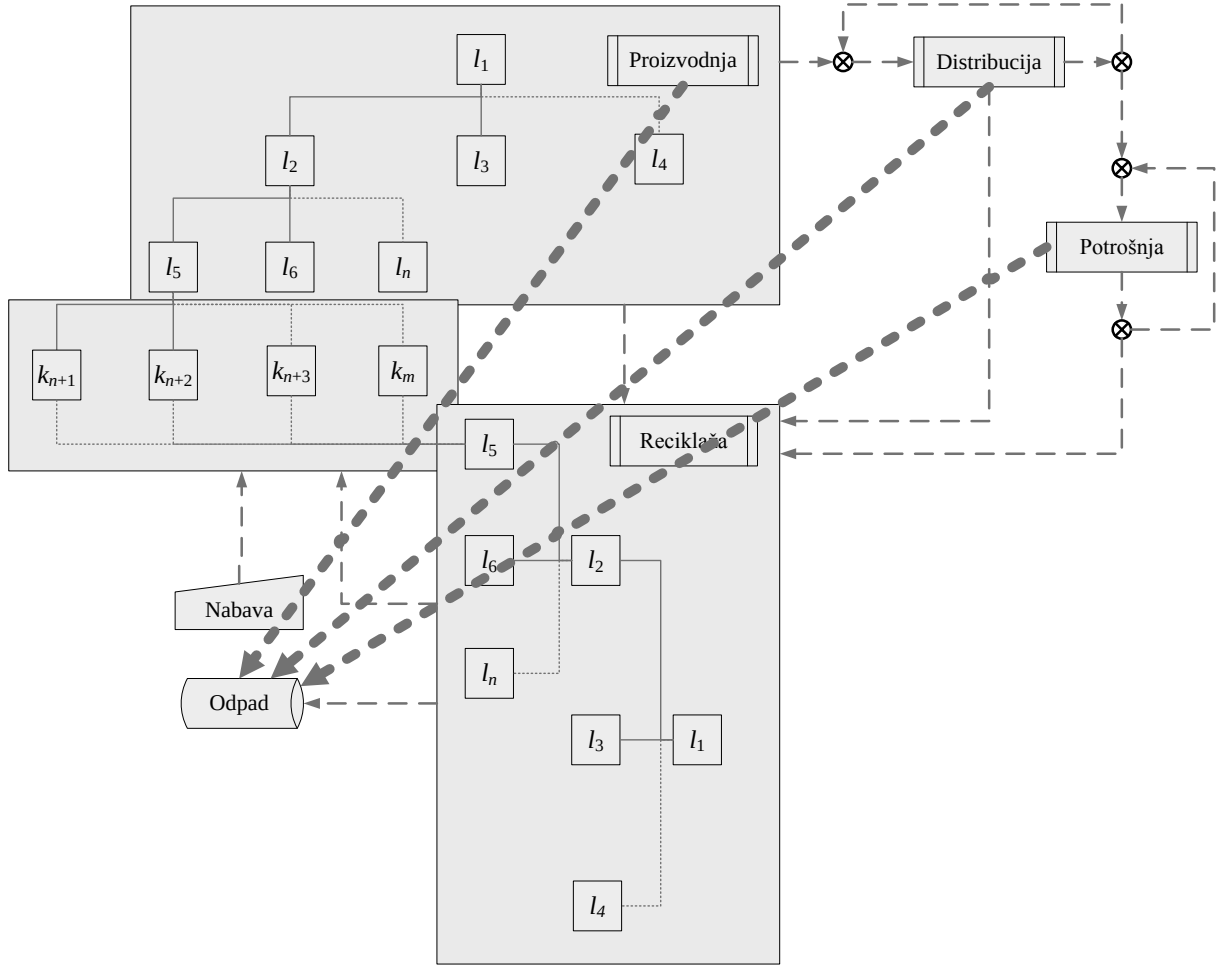
$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{11} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & g_{22} & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & g_{33} & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & g_{nn} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & g_{(n+1)(n+1)} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & g_{(n+2)(n+2)} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & g_{mm} \end{bmatrix} \quad (166)$$

Obravnavo izgub sistema kot celote lahko razširimo na model razširjene teorije planiranja materialnih potreb. Do izgub lahko torej prihaja znotraj katerekoli celice aktivnosti proizvodnega, distribucijskega, potrošnega ali reciklažnega podsistema oziroma pri kateremkoli prehodu med dvema zaporednima celicama aktivnosti. Izgube lahko vključimo z dvema različnima pristopoma:

- 1) obravnavamo jih kot samostojen (nov) podsistem izgubljenih elementov,
- 2) obravnavamo jih kot tok izgubljenih elementov na odpad v okviru prehoda skozi reciklažni podsistem (kar prikazujemo na Sliki 22).

V primeru obravnave izgub znotraj samostojnega podsistema se kompleksnost celotnega modela izrazito poveča. Tak pristop omogoča spremljanje izgub v okviru samostojnih tokov, pri čemer lahko ocenjujemo količino in neto sedanjo vrednost za vsak posamični tok izgubljenih elementov. Drugi pristop pa predpostavlja, da bodo izgube zapustile sistem na enak način kot nerekicirani elementi reciklažnega podsistema. To pomeni, da lahko izgube obravnavamo kot tok elementov skozi reciklažni podsistem, pri čemer so stopnje reciklaže $\alpha = 0$. Vsi elementi torej končajo kot odpad in predstavljajo izhod sistema. Takšen način vključitve v razširjeni model teorije planiranja materialnih potreb prikazujemo na Sliki 22 in podrobneje analiziramo v nadaljevanju tega podpoglavja.

Slika 22: Izgube proizvodnega, distribucijskega in potrošnega podsistema, obravnavane kot odpadni material



Vsakemu izstopnemu toku iz katerekoli celice aktivnosti v reciklažni podsistem lahko dodamo še izgubljene elemente, ki se reciklirajo po stopnji reciklaže 0. Takšno vključitev lahko izvedemo z modifikacijo enačbe (91), tako da reciklažni koeficient α_{kl} ustrezno korigiramo za elemente, ki jih obravnavamo kot izgubljene:

$$\alpha_{kl} = \sum_{n'=l}^3 \left(\left(\prod_{i=k,l,l-1,\dots,n',4}^{n',4} \beta_i \alpha_i \right)_{n'} * (1-\eta)_{n'} \right) \quad (167)$$

Parameter η predstavlja delež elementov, ki izstopijo iz celice aktivnosti n' v reciklažni podsistem in pomenijo izgube sistema. Zadoščeno mora biti pogoju $0 \leq \eta \leq 1$, pri čemer skrajna pozicija:

- 1) $\eta = 0$ pomeni, da pri izstopu iz pripadajoče celice aktivnosti n' ne prihaja do izgub; vsi elementi vstopijo v proces reciklaže,

- 2) $\eta = 1$ pomeni, da pri izstopu iz pripadajoče celice aktivnosti n' prihaja izključno do izgub; noben od elementov ne vstopi v proces reciklaže (reciklažni koeficient α_{kl} ima vrednost 0).

Obnašanje modela po vključitvi izgub lahko ponazorimo na numeričnem primeru iz podpoglavja 3.1.6. Vpeljemo dodatno predpostavko, da 25 % vseh elementov, ki izstopajo iz katerekoli celice aktivnosti v proces reciklaže, predstavlja izgubo ($\eta = 0,25$ za vsak n'). Preostalih 75 % elementov recikliramo po že obstoječih pravilih. V Tabeli 10 prikazujemo izračune stopenj reciklaže α_{k4l3} , α_{k5l2} in α_{k5l1} z upoštevanjem izgub (osnova za izračun je Tabela 9).

Tabela 10: Izračun končnih stopenj reciklaže α_{k4l3} , α_{k5l2} in α_{k5l1} v primeru izgub

n'	$l3$	$l2$	$l1$	2	3	Vsota
α_{k4l3}	$0,2*0,5*$ $*0,75$	$0,8*0,2*$ $*0,5*0,4*$ $*0,75$	$0,8^2*0,2*$ $*0,5*0,4*$ $*0,2*0,75$	$0,8^3*0,2*$ $*0,4*0,3*$ $*0,2*0,75$	$0,8^4*0,3*$ $*0,2*0,1*$ $*0,75$	0,1065
α_{k5l2}		$0,2*0,5*$ $*0,75$	$0,8*0,2*0,5*$ $*0,4*0,75$	$0,8^2*0,2*$ $*0,4*0,35*$ $*0,75$	$0,8^3*0,3*$ $*0,3*0,75$	0,1470
α_{k5l1}			$0,2*0,7*$ $*0,75$	$0,8*0,2*$ $*0,6*0,75$	$0,8^2*0,5*$ $*0,75$	0,4170

Vhodi sistema se ob dodani predpostavki o obravnavi izgub ne spremenijo, zato generalizirana vhodna matrika $\tilde{\mathbf{H}}(\rho)$ ohrani enako obliko kot v numeričnem primeru v podpoglavju 3.1.6.

Za razliko od vhodne matrike pa se z vpeljavo tokov, ki predstavljajo izgube sistema, spremeni generalizirana izhodna matrika $\tilde{\mathbf{G}}(\rho)$. Izgube sistema zajamemo v končne stopnje reciklaže (prikazane v Tabeli 10), zato se spremenijo vrednosti koeficientov g_{ij}^{14} in g_{ij}^{44} v pripadajočih generaliziranih podmatrikah $\tilde{\mathbf{G}}_{14}(\rho)$ in $\tilde{\mathbf{G}}_{44}(\rho)$. Končna generalizirana izhodna matrika $\tilde{\mathbf{G}}(\rho)$ postane ob upoštevanju izgub, pri čemer je $\eta = 0,25$ za vsak n' :

$$\tilde{\mathbf{G}}(\rho) = \tilde{\Delta}^{pr}(\rho) \tilde{\mathbf{G}}^{tr}(\rho) = \quad (168)$$

$$=$$

Vključitev tokov izgubljenih elementov na končni izračun neto sedanje vrednosti vpliva tudi preko spremembe stroškov, povezanih s transportom. Ker izgubljeni elementi svoje poti ne zaključijo v reciklažnem podsistemu, moramo njihove transportne stroške obravnavati zgolj kot izmet izgubljenih elementov iz sistema. Te stroške lahko vključimo v stroške transporta odpadnih elementov na deponijo, saj jih obravnavamo na podoben način kot izhode sistema (npr. strošek potopljene ladje z upoštevanjem zavarovalnih premij za nezgodo ipd.). Vhodna matrika transportnih stroškov $\tilde{\Pi}_H(\rho)$ zato ostane nespremenjena, izhodna matrika transportnih stroškov $\tilde{\Pi}_G(\rho)$ pa spremeni svojo strukturo zaradi spremembe izhodnih koeficientov g_{ij}^{14} in g_{ij}^{44} ter spremembe transportnih stroškov b_{ij}^{44} , ki predstavljajo transportni strošek izhodnih elementov (izgube).

Ob predpostavki, da se transportni stroški b_{ij}^{44} povečajo za 10 % glede na inicialne vrednosti iz numeričnega primera, predstavljenega v podpoglavju 3.1.6, lahko ob upoštevanju novih tehničnih koeficientov g_{ij}^{14} in g_{ij}^{44} zapišemo matriko $\tilde{\Pi}_G(\rho)$ v naslednji obliki:

$$\tilde{\Pi}_G(\rho) = \quad (169)$$

$$= \tilde{\Delta}^{pr}(\rho) =$$

$0g_{11}^{11}\Delta_{11}^{11}$	$0g_{21}^{11}\Delta_{21}^{11}$	$0g_{32}^{11}\Delta_{32}^{11}$	$0g_{42}^{11}\Delta_{42}^{11}$	$0g_{53}^{11}\Delta_{53}^{11}$	$0g_{63}^{11}\Delta_{63}^{11}$				
								$12g_{73}^{14}\Delta_{73}^{14}$	
							$2g_{81}^{14}\Delta_{81}^{14}$	$2g_{82}^{14}\Delta_{82}^{14}$	
		$8g_{11}^{22}\Delta_{11}^{22}$	$7g_{21}^{22}\Delta_{21}^{22}$	$4g_{31}^{22}\Delta_{31}^{22}$					
						$6g_{11}^{33}\Delta_{11}^{33}$			
								$2,2g_{13}^{44}\Delta_{13}^{44}$	
							$5,5g_{21}^{44}\Delta_{21}^{44}$	$5,5g_{22}^{44}\Delta_{22}^{44}$	

$0,000$	$0,000$	$0,000$	$0,000$	$0,000$	$0,000$				
									$6,600$
							$2,959$	$1,565$	
		$7,680$	$2,240$	$1,280$					
						$19,200$			
									$27,895$
							$41,027$	$51,453$	

Skupno neto sedanjo vrednost vseh štirih podsistemov z upoštevanjem izgub izračunamo kot:

$$\begin{aligned} \text{NSV} &= \mathbf{p}(\tilde{\mathbf{G}}(\rho) - \tilde{\mathbf{H}}(\rho))\tilde{\mathbf{P}}(\rho) - \hat{\mathbf{K}}\tilde{\mathbf{v}}(\rho) - \mathbf{U}^T(\tilde{\Pi}_G(\rho) + \tilde{\Pi}_H(\rho))\tilde{\mathbf{P}}(\rho) = \\ &= 2.010.752,96 - 101.950,19 - 2.365.754,41 = -456.951,64 \end{aligned} \quad (170)$$

Neto sedanja vrednost prihodkov $\mathbf{p}(\tilde{\mathbf{G}}(\rho) - \tilde{\mathbf{H}}(\rho))\tilde{\mathbf{P}}(\rho)$ se zaradi vpeljave izgub sistema zniža za 30.658,92. To znižanje je neposredno povezano z znižanjem deleža dejansko recikliranih elementov, ki bi jih lahko uporabili v naslednjem proizvodnem ciklu. Kadar je

reciklaža z ekonomskega vidika manj privlačna (ko so stroški reciklaže višji od stroškov deponiranja odpadnih elementov in nakupa novih), pa lahko pričakujemo manjši negativni vpliv tokov izgub na neto sedanjo vrednost prihodkov.

Zaradi razširitve modela z izgubami se neto sedanja vrednost vzpostavitvenih stroškov $\hat{\mathbf{K}}\tilde{\mathbf{v}}(\rho)$ ne spremeni, saj posamični cikli ostajajo enaki, vzpostavitveni stroški pa posledično ostajajo fiksni. Po drugi strani lahko opazimo relativno velik vpliv izgub na neto sedanjo vrednost transportnih stroškov $\mathbf{U}^T (\tilde{\mathbf{\Pi}}_G(\rho) + \tilde{\mathbf{\Pi}}_H(\rho)) \tilde{\mathbf{P}}(\rho)$, ki se zaradi spremembe tehničnih koeficientov (dejanske stopnje reciklaže se znižajo) in transportnih stroškov izgubljenih elementov povečajo za 151.290,39.

Skupna neto sedanja vrednost sistema na podlagi obravnavanega numeričnega primera se zaradi vpeljave izgub v model zniža s predhodnih – 275.002,33 na – 456.951,64. Izguba sistema se torej zaradi vpeljave izgub ob drugih nespremenjenih parametrih poveča za 181.949,31.

3.3 ZDRUŽITEV MODELA Z VKLJUČENIMI VSEMI TOKOVI

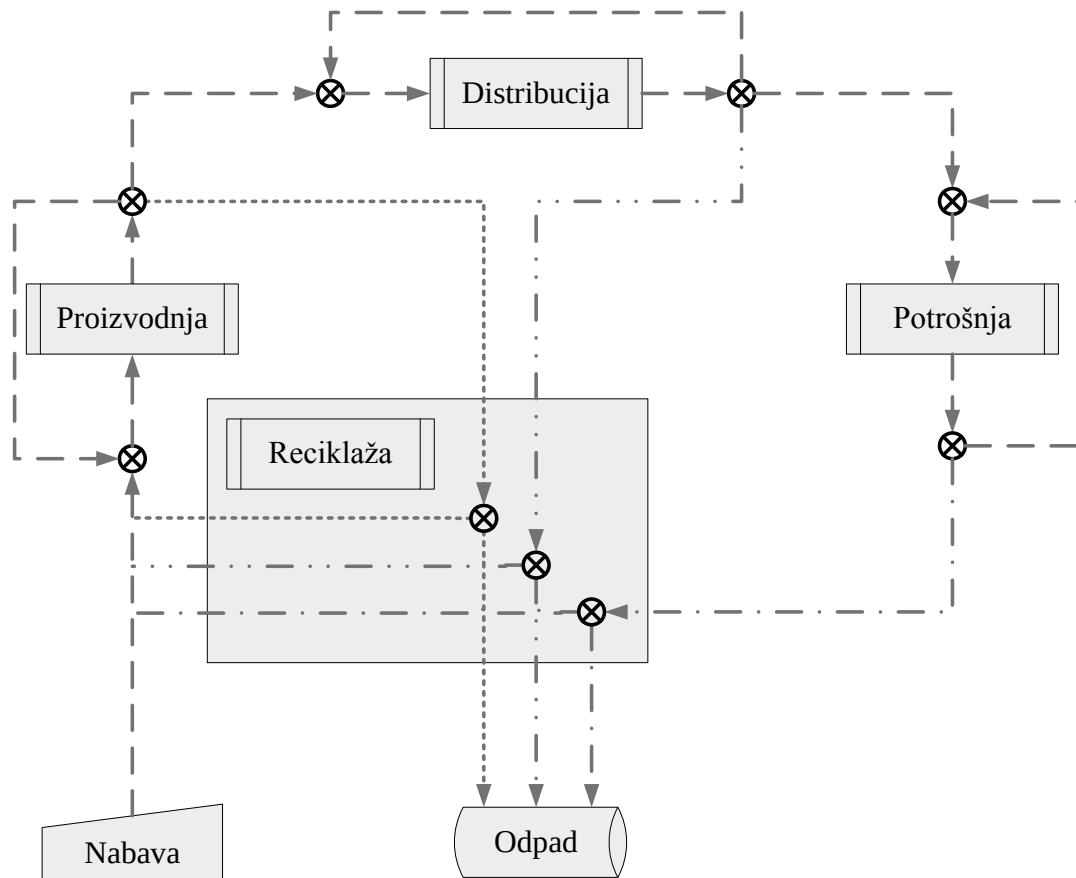
Splošni zapis vhodno-izhodnih matrik, ki ga predstavljamo v podpoglavju 3.1, lahko razčlenimo tako, da bo vseboval informacije o vsakem posamičnem toku znotraj sistema. S takšno razširitvijo pridobimo boljše izhodišče za podrobnejšo analizo sistema. Vsakemu posamičnemu elementu lahko namreč sledimo skozi več zaporednih ciklov, vse dokler ne zaključi svoje poti kot odpadki na deponiji. Kompleksnost sistema z dodatno razčlenitvijo izrazito naraste, kar je še posebej problematično, kadar imamo znotraj kosovnice več elementov in je ta široko razvejana.

S takšnim pristopom k proučevanju problematike lahko vsak element sistema, ki preide v reciklažni podsistem, obravnavamo kot samostojen končni proizvod. Vsak posamični element, ki nastopa kot gradnik vhodne komponente v reciklažni podsistem, moramo torej proučevati preko samostojnega materialnega toka. Kot izhodni element lahko torej označimo vse izhodne komponente, ki predstavljajo tok nekega sestavnega elementa z nižjega nivoja kosovnice v reciklažo, ne glede na njegov izvorni podsistem. Vsak izhodni element se znotraj sistema obnaša kot končni proizvod, ki služi kot izvor za pridobivanje njegovih sestavnih elementov.

Tokove iz posamičnih podsistemov v reciklažni podsistem prikazujemo na Sliki 23. V reciklažnem podsistemu vsak vhodni tok posamičnega elementa razpade na dva ločena izhodna tokova:

- 1) tok odpadnih elementov na deponijo,
- 2) tok uspešno recikliranih elementov nazaj v proizvodnjo.

Slika 23: Tokovi elementov iz posamičnih podsistemov v reciklažo in sledenje njihovega povratnega vhoda v proizvodnjo oziroma izhoda na odpad



V okviru izhodnih tokov proizvodnega, distribucijskega in potrošnega podsistema v reciklažni podsistem opazujemo tokove za vsako posamično izhodno celico aktivnosti. Na primeru proizvodnega podsistema torej obravnavamo ločeno vsak fizično dovoljen tok iz posamičnih celic aktivnosti, pri katerem lahko pride do izhoda v reciklažni podsistem (iz vsakega montažnega nivoja kosovnice). Za vsak obravnavani izhodni tok elementov katerekoli celice aktivnosti lahko sledimo ponovni vstop elementov v proizvodni podsistem ali njihov izhodni tok na deponijo. Takšen sistem je mogoče zapisati v splošni obliki, kar proučujemo v nadaljevanju tega poglavja.

3.3.1 Zapis vhodne matrike v splošni obliki

Kompleksnost strukture vhodne matrike $\mathbf{H}$, ki vključuje vse tokove sistema, se v splošni obliki zapisa poveča glede na zapis v podpoglavju 3.1.1. Njene pozitivne podmatrike lahko v splošni obliki zapišemo na naslednji način:

$$\mathbf{H}_{11} = \begin{bmatrix}
0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\
h_{41}^{11} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\
0 & h_{52}^{11} & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & h_{63}^{11} & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & h_{kl}^{11} & 0 & \cdots & 0 & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 & h_{(k+1)(l+1)}^{11} & \cdots & 0 & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 & 0 & \cdots & h_{(k+p+2)(l+p+2)}^{11} & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\
0 & 0 & h_{(n-1)3}^{11} & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \ddots & h_{(n-1)(n-2)}^{11} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\
h_{(n+1)1}^{11} & 0 & 0 & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & h_{kl}^{11} & 0 & \cdots & 0 & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 & h_{(k+1)(l+1)}^{11} & \cdots & 0 & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 & 0 & \cdots & h_{(k+p+2)(l+p+2)}^{11} & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\
0 & 0 & h_{m3}^{11} & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \ddots & 0 & 0 & h_{mn}^{11}
\end{bmatrix} \quad (171)$$

Zgornji del podmatrike $\mathbf{H}_{11}$ zajema koeficiente od h_{11}^{11} do h_{mn}^{11} , ki pomenijo število zahtevanih izhodnih elementov k , ki jih potrebujemo za proizvodnjo enega izhodnega elementa l na višjem nivoju. Vsak posamični izhodni element k je predstavljen v samostojni vrstici, njegovo pravilno pozicioniranje v podmatriki $\mathbf{H}_{11}$ pa je bistvenega pomena za pravilno obravnavo sistema. Zaporedje vključitve izhodnih elementov k v podmatriko $\mathbf{H}_{11}$ se mora začeti z izhodnim elementom, ki opravi najdaljšo pot v sistemu, sledijo pa mu izhodni elementi s krajšimi potmi. Za lažje razumevanje navajamo nekaj primerov:

- 1) $k = 1$ predstavlja končni proizvod, ki vstopi v reciklažo iz potrošnega podsistema,
- 2) $k = 2$ predstavlja končni proizvod, ki zaključi svoj cikel s preходом iz distribucije neposredno v reciklažo,
- 3) $k = 4$ predstavlja komponento s prvega nivoja kosovnice, ki služi kot sestavni del končnega proizvoda in svojo pot zaključi v potrošnji.

Za vrednosti $k = 1, 2, 3$ bo imela podmatrika $\mathbf{H}_{11}$ same ničelne koeficiente, saj v teh primerih obravnavamo končni proizvod, ki se ne uporablja v nadaljnjih montažnih procesih. Ničelni koeficienti se bodo pojavili tudi, kadar je $k = l$, saj komponente k ni mogoče uporabiti za njeno lastno izdelavo. Montažni koeficienti tečejo za vsak izhodni element vedno diagonalno: $h_{kl}^{11}, h_{(k+1)(l+1)}^{11}, \dots, h_{(k+p+2)(l+p+2)}^{11}$, pri čemer je p nivo nahajanja v kosovnici (npr: končni proizvod, ki se nahaja najvišje v kosovnici, vedno zavzame vrednost $p = 1$; komponente, ki se uporabljajo neposredno za sestavljanje končnega proizvoda, se nahajajo na drugem nivoju kosovnice in vedno zavzamejo vrednost $p = 2$; njihove sestavne komponente zavzamejo vrednost $p = 3$; itd.).

Spodnji del podmatrike $\mathbf{H}_{11}$ vsebuje koeficiente od $h_{(n+1)1}^{11}$ do h_{nn}^{11} , ki povejo, koliko enot osnovnih gradnikov (surovine) k potrebujemo za izgradnjo komponente l na višje ležečem nivoju, in sicer za vsak posamični izhodni element. Vsak gradnik k posamičnega izhodnega elementa zavzame eno vrstico, koeficienti pa tečejo diagonalno, podobno kot v zgornjem delu podmatrike $\mathbf{H}_{11}$.

$$\mathbf{H}_{12} = \begin{bmatrix} h_{11}^{12} & 0 \\ 0 & h_{22}^{12} \\ 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \hline \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_{14} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & h_{33}^{14} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_{77}^{14} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & h_{(k+p+3)(k+p+3)}^{14} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & h_{nn}^{14} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (172)$$

V distribucijski podsistem vstopijo samo izhodni elementi, za katere velja $k = 1, 2$. Gre za končni proizvod, ki vstopi v reciklažni podsistem preko podsistema potrošnje ($k = 1$) ali pa neposredno iz podsistema distribucije ($k = 2$). Posledično vsebuje podmatrika $\mathbf{H}_{12}$ samo dva

neničelna koeficienta: h_{11}^{12} in h_{22}^{12} . Samo zadnji zaporedni izhodni element vsake komponente preide neposredno v reciklažni podsistem, zato ima podmatrika $\mathbf{H}_{14}$ neničelne koeficiente $h_{33}^{14}, h_{(k+p+3)(l+p+3)}^{14}, \dots, h_{nn}^{14}$.

Druga in tretja vrstica vhodne matrike $\mathbf{H}$ vsebujeta 3 podmatrike z neničelnimi koeficienti:

$$\mathbf{H}_{23} = \begin{bmatrix} h_{11}^{23} \\ \vdots \\ h_{r1}^{23} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_{24} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & h_{(r+1)2}^{24} & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_{34} = \begin{bmatrix} h_{(r+1)1}^{34} & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (173)$$

Strukture teh treh podmatrik in pomen njihovih neničelnih koeficientov se skladajo s strukturami, ki jih prikazujemo v podpoglavju 3.1.1, saj obravnavajo izključno tokove končnega proizvoda.

3.3.2 Zapis izhodne matrike v splošni obliki

Dimenzija izhodne matrike $\mathbf{G}$ tudi v primeru opazovanja sistema z vključenimi vsemi tokovi vedno sovпада z dimenzijo vhodne matrike $\mathbf{H}$, kar je skladno z ugotovitvami iz podpoglavja 3.1.2. V primeru obravnave modela z vsemi tokovi na nivoju izhodnih elementov lahko podmatrike $\mathbf{G}_{11}$, $\mathbf{G}_{22}$ in $\mathbf{G}_{33}$ izhodne matrike $\mathbf{G}$ v splošni obliki zapišemo na naslednji način:

$$\mathbf{G}_{11} = \begin{bmatrix} g_{11}^{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & g_{22}^{11} & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & g_{nn}^{11} \\ \hline 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_{22} = \begin{bmatrix} g_{11}^{22} & 0 \\ \vdots & \vdots \\ g_{r1}^{22} & 0 \\ 0 & g_{(r+1)1}^{22} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_{33} = \begin{bmatrix} g_{11}^{33} \end{bmatrix} \quad (174)$$

Neničelni koeficienti g_{kl}^{11} podmatrike $\mathbf{G}_{11}$ se pojavijo, kadar velja $k = l$, in sicer za vrednosti $k = 1, 2, \dots, n$. Koeficienti g_{kl}^{11} predstavljajo izstopne deleže iz proizvodnega podsistema za izhodne elemente k . Ker se vsak izhodni element obnaša kot neodvisni končni proizvod, mora proizvodni podsistem zapustiti v celoti. To pomeni, da neničelni koeficienti g_{kl}^{11} v primeru $k = l$ običajno zavzamejo vrednost 1.

Končni proizvod je edini izhodni element podmatrik $\mathbf{G}_{22}$ in $\mathbf{G}_{33}$, kar pomeni, da je njuna struktura v splošni obliki podobna strukturi, ki jo predstavljamo v podpoglavju 3.1.2. Razlika

se pojavi pri dimenziji podmatrike $\mathbf{G}_{22}$, kar je posledica obravnave končnega proizvoda kot dveh ločenih izhodnih elementov distribucijskega podsistema:

- 1) prvi predstavlja tok končnega proizvoda iz distribucijskega podsistema v reciklažni podsistem,
- 2) drugi pa predstavlja tok končnega proizvoda od distribucijskega podsistema do reciklažnega podsistema preko podsistema potrošnje.

Zadnji dve neničelni podmatriki izhodne matrike $\mathbf{G}$ sta podmatriki $\mathbf{G}_{14}$ in $\mathbf{G}_{44}$. Njun pomen je vsebinsko identičen kot v podpoglavju 3.1.2. Podmatriki $\mathbf{G}_{14}$ in $\mathbf{G}_{44}$ se razlikujeta le v strukturi reciklažnih koeficientov g_{kl}^{14} in g_{kl}^{44} , ki predstavljajo deleže recikliranih in nerecikliranih (odpadnih) osnovnih elementov, ki so rezultat reciklažnih aktivnosti na kateremkoli izmed izhodnih elementov:

$$\mathbf{G}_{14} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \hline g_{(n+1)1}^{14} & g_{(n+1)2}^{14} & \cdots & & & \cdots & & \cdots & 0 \\ g_{(n+2)1}^{14} & g_{(n+2)2}^{14} & \cdots & & & \cdots & & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ & & & \cdots & g_{kl}^{14} & 0 & \cdots & 0 & \cdots \\ & & & \cdots & 0 & g_{(k+1)(l+1)}^{14} & \cdots & 0 & \cdots \\ & & & \cdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \cdots \\ & & & \cdots & 0 & 0 & \cdots & g_{(k+p+2)(l+p+2)}^{14} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ 0 & 0 & \cdots & & & \cdots & & \cdots & g_{mn}^{14} \end{bmatrix} \quad (175)$$

$$\mathbf{G}_{44} = \begin{bmatrix} g_{11}^{44} & g_{12}^{44} & \cdots & & \cdots & & \cdots & 0 \\ g_{21}^{44} & g_{22}^{44} & \cdots & & \cdots & & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ & & & \cdots & g_{kl}^{44} & 0 & \cdots & 0 & \cdots \\ & & & \cdots & 0 & g_{(k+1)(l+1)}^{44} & \cdots & 0 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ & & \cdots & 0 & 0 & \cdots & g_{(k+p+2)(l+p+2)}^{44} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & & & \cdots & & \cdots & g_{(m-n)n}^{44} \end{bmatrix} \quad (176)$$

Ker obravnavamo zaprt sistem, mora za vsak k in l veljati $g_{kl}^{14} + g_{(k-l)l}^{44} = h_{kl}^{11}$. Tudi tukaj velja, da spodnji del podmatrike $\mathbf{G}_{14}$ po dimenziji in legi neničelnih koeficientov sovpada s

podmatriko $\mathbf{G}_{44}$. Koeficiente g_{kl}^{14} in $g_{(k-l)l}^{44}$ v matematični formulaciji izrazimo na naslednji način:

$$g_{kl}^{14} = h_{kl}^{14} * \alpha_{kl} \quad (177)$$

$$g_{(k-l)l}^{44} = h_{kl}^{11} * (1 - \alpha_{kl}) \quad (178)$$

Koeficienti α_{kl} predstavljajo stopnje reciklaže osnovnih elementov k iz izhodnih elementov l . Vrednosti, večje od 0, se tako pojavijo samo takrat, kadar osnovni element k recikliramo iz izhodnega elementa l . Dejanski reciklažni koeficient α_{kl} je odvisen od vseh delnih reciklažnih koeficientov α pred vstopom v reciklažni podsistem in ga lahko v splošni obliki zapišemo na naslednji način:

$$\alpha_{kl} = \sum_{n'=l}^3 \left(\prod_{i=k, l-1, \dots, n', 4}^{n', 4} \alpha_i \right)_{n'} \quad (179)$$

Gre za poenostavljeno enačbo (91), iz katere so izločeni koeficienti prehodov med posamičnimi celicami aktivnosti β . Ker opazujemo individualne tokove vsakega posamičnega izhodnega elementa, namreč koeficientov prehodov med celicami aktivnosti ni treba upoštevati.

3.3.3 Zapis neto proizvodnje v splošni obliki

Splošni zapis vektorja gostote tokov v primeru opazovanja sistema z vključenimi vsemi tokovi je podoben splošnemu zapisu, kot je predstavljen v podpoglavju 3.1.3:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 \\ \mathbf{P}_2 \\ \mathbf{P}_3 \\ \mathbf{P}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \\ \dots \\ Q_1 \\ Q_2 \\ \dots \\ Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix} \quad (180)$$

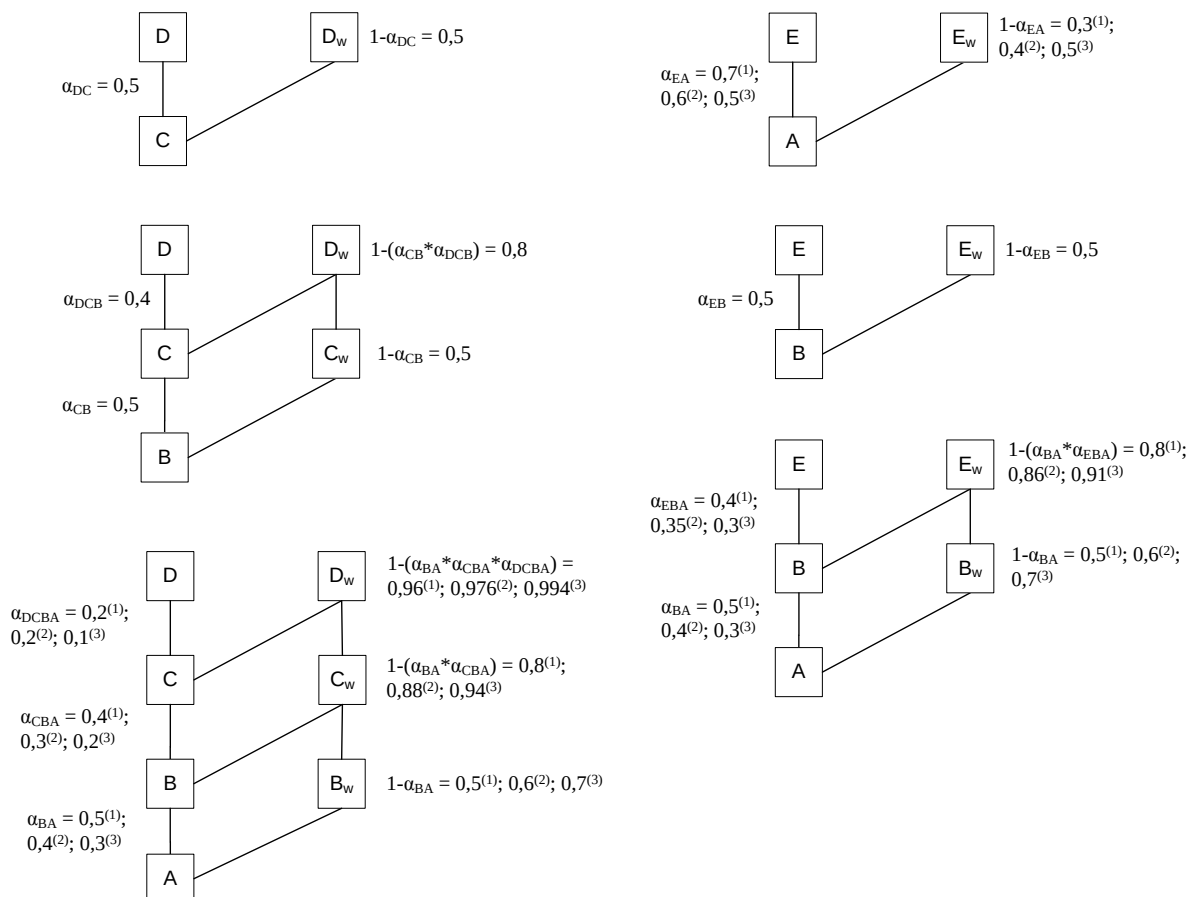
Pomembna razlika je v interpretaciji posamičnih vrednosti $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$, ki v tem primeru predstavljajo količine kateregakoli izhodnega elementa 1, 2, ..., n znotraj cikla.

V splošnem lahko neto proizvodnjo v primeru opazovanja sistema z vključenimi vsemi tokovi zapišemo na povsem enak način kot v podpoglavju 3.1.3. Kljub temu pa moramo poudariti, da se Q_i^{14} in Q_i^{44} v tem primeru nanašata na elemente z najnižjega nivoja kosovnice, ki jih recikliramo iz kateregakoli izhodnega elementa 1, 2, ..., n . Pri tem je n posledično vedno večji, kot bi bil za enak sistem z uporabo pristopa, ki ga obravnavamo v podpoglavju 3.1.

3.3.4 Prikaz modela na numeričnem primeru

Obnašanje modela, ki vključuje vse možne tokove znotraj sistema, lahko sedaj preverimo na istem numeričnem primeru kot v podpoglavju 3.1.4. Elementa D in E lahko recikliramo po 12 različnih poteh (tokovih), kar prikazujemo na Sliki 24. Elementa D in E lahko pridobivamo iz končnega proizvoda A iz treh izvornih podsistemov, ki so označeni z indeksi: 1 – proizvodnja, 2 – distribucija in 3 – potrošnja. Kot prikazujemo v Tabelah 1 in 2, se koeficienti reciklaže razlikujejo med tremi izhodnimi podsistemi končnega proizvoda A. Z indeksom W označujemo odpadne elemente.

Slika 24: Vsi možni tokovi razstavljanja posamičnih komponent sistema z vmesnimi reciklažnimi koeficienti



V skladu s splošnim zapisom lahko zapišemo vhodno matriko $\mathbf{H}$ in vektor gostote tokov $\mathbf{P}$ za obravnavani primer z numeričnimi vrednostmi v naslednji obliki:

[illegible]

Kot lahko razberemo iz matrike $\mathbf{H}$, ima za proučevani primer podmatrika $\mathbf{H}_{11}$ dimenzijo 24×12 . To pomeni, da komponente sistema razpadejo na 12 izhodnih elementov oziroma tokov, ki so vhodi v reciklažni podsistem:

- 1) A, ki izhaja iz potrošnje,
- 2) A, ki izhaja iz distribucije,

- 3) A, ki izhaja iz proizvodnje,
- 4) B kot sestavina A, ki izhaja iz potrošnje,
- 5) B kot sestavina A, ki izhaja iz distribucije,
- 6) B kot sestavina A, ki izhaja iz proizvodnje,
- 7) B, ki izhaja iz proizvodnje,
- 8) C kot sestavina B, ki preko A izhaja iz potrošnje,
- 9) C kot sestavina B, ki preko A izhaja iz distribucije,
- 10) C kot sestavina B, ki preko A izhaja iz proizvodnje,
- 11) C kot sestavina B, ki izhaja iz proizvodnje,
- 12) C, ki izhaja iz proizvodnje.

Vsak izmed 12 izhodnih elementov podmatrike $\mathbf{H}_{11}$ razpade na več izhodnih elementov, ki jih zapisujemo v samostojnih vrsticah, in sicer od najvišjega nivoja proti najnižjemu nivoju. Spodnji del podmatrike vsebuje dodatnih 12 vrstic. Te vrstice pripadajo osnovnim elementom D in E z najnižjega nivoja kosovnice, ki se uporabijo v montažnem procesu izhodnih elementov v zgornjem delu podmatrike.

Zaradi obsežnosti izhodne matrike $\mathbf{G}$ v nadaljevanju predstavljamo njene posamične podmatrike s pripadajočimi vrednostmi v skladu s splošnim zapisom izhodne matrike, ki ga predstavljamo v podpoglavju 3.3.2:

$$\mathbf{G}_{11} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & & & & & \\ & 1 & & & & & & & & & \\ & & 1 & & & & & & & & \\ & & & 1 & & & & & & & \\ & & & & 1 & & & & & & \\ & & & & & 1 & & & & & \\ & & & & & & 1 & & & & \\ & & & & & & & 1 & & & \\ & & & & & & & & 1 & & \\ & & & & & & & & & 1 & \\ & & & & & & & & & & 1 \\ & & & & & & & & & & & \vdots \\ & & & & & & & & & & & \vdots \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_{22} = \begin{bmatrix} 0,75 & \\ 0,25 & \\ & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_{33} = [1] \quad (182)$$

$$\mathbf{G}_{14} = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ & & & & & & & 2*0,006 & & & & \\ & & & & & & & & 2*0,024 & & & \\ & & & & & & & & & 2*0,04 & & \\ & & & & & & & & & & 2*0,2 & \\ & & & & & & & & & & & 2*0,5 \\ 2*0,5 & & & & & & & & & & & \\ & 2*0,6 & & & & & & & & & & \\ & & 2*0,7 & & & & & & & & & \\ & & & 2*0,09 & & & & & & & & \\ & & & & 2*0,14 & & & & & & & \\ & & & & & 2*0,2 & & & & & & \\ & & & & & & 2*0,5 & & & & & \end{bmatrix} \quad (183)$$

$$\mathbf{G}_{44} = \begin{bmatrix} & & & & & & & & 2*0,994 & & & \\ & & & & & & & & & 2*0,976 & & \\ & & & & & & & & & & 2*0,96 & \\ & & & & & & & & & & & 2*0,8 \\ & & & & & & & & & & & & 2*0,5 \\ 2*0,5 & & & & & & & & & & & & \\ & 2*0,4 & & & & & & & & & & & \\ & & 2*0,3 & & & & & & & & & & \\ & & & 2*0,81 & & & & & & & & & \\ & & & & 2*0,86 & & & & & & & & \\ & & & & & 2*0,8 & & & & & & & \\ & & & & & & 2*0,5 & & & & & & \end{bmatrix} \quad (184)$$

Neto proizvodnja takšnega sistema je v skladu s splošno obliko zapisa, ki jo predstavljamo v podpoglavju 3.3.3:

$$\mathbf{z} = \mathbf{y} - \mathbf{x} = (\mathbf{G} - \mathbf{H})\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ -10.179 \\ -2.498 \\ -3.072 \\ -3.200 \\ -2.500 \\ -640 \\ -128 \\ -120 \\ -2.330 \\ -550 \\ -640 \\ -500 \\ \hline 0 \\ 0 \\ 0 \\ \hline 0 \\ \hline 10.179 \\ 2.498 \\ 3.072 \\ 3.200 \\ 2.500 \\ 640 \\ 128 \\ 120 \\ 2.330 \\ 550 \\ 640 \\ 500 \end{bmatrix} \quad (185)$$

10.179 enot odpadnega elementa D nastane pri razstavljanju končnega proizvoda A iz potrošnje, 2.498 enot pri razstavljanju A iz distribucije in 3.072 enot pri razstavljanju A iz proizvodnje. Dodatnih 3.200 enot odpadnega elementa D nastane zaradi razstavljanja komponente B iz proizvodnje in 2.500 zaradi razstavljanja komponente C iz proizvodnje.

Podobno nastopa E kot osnovni gradnik končnega proizvoda A. Zato je odpadnih 640 enot elementa E zaradi izvajanja reciklažnih aktivnosti na končnem proizvodu A iz potrošnje, 128

enot zaradi reciklažnih aktivnosti na A iz distribucije in 120 enot zaradi reciklažnih aktivnosti na A iz proizvodnje. Element E nastopa tudi kot gradnik komponente B, ki jo prav tako recikliramo v procesu razstavljanja A. Tako nastane 2.330 odpadnih enot elementa E kot rezultat reciklaže gradnika B, ki preko končnega proizvoda A vstopi v reciklažni podsistem iz potrošnje, 550 enot kot rezultat reciklaže B, ki preko A vstopi iz distribucije, in 640 enot kot rezultat reciklaže B, ki preko A vstopi iz proizvodnje. Dodanih 500 odpadnih enot elementa E nastane pri reciklaži komponente B, ki v reciklažni podsistem vstopi neposredno iz proizvodnje. Odpadne količine komponent D in E moramo ob začetku naslednjega cikla nadomestiti z uspešno recikliranimi komponentami iz reciklažnega podsistema, preostale manjkajoče elemente za izvedbo cikla pa pridobimo z nakupom novih komponent na trgu surovin.

Iz dobljenih rezultatov lahko razberemo, da so s sumarnega vidika reciklirane in odpadne količine elementov D in E identične kot v podpoglavju 3.1.4. Kumulativno rezultati torej sovpadajo, pri pristopu z vključenimi vsemi tokovi pa pridobimo podrobnejše informacije o vsakem posamičnem toku. To pomeni, da sledimo vsakemu posamičnemu elementu, kar razširi možnosti opazovanja oziroma podrobnega raziskovanja oskrbovalnih verig. Kot pa lahko vidimo že iz relativno enostavnega numeričnega primera, te podrobnejše informacije povzročijo tudi bistveno povečanje kompleksnosti sistema.

3.4 Testiranje modela s pomočjo simulacij

Modeli, ki jih razvijamo v tej doktorski disertaciji, so kompleksni, zato sta analiza obnašanja in odkrivanje zakonitosti znotraj celostnih oskrbovalnih verig izredno težavna. Vpliv posamičnega parametra na celostno oskrbovalno verigo zato lažje opazujemo z uporabo simulacij, ki nam omogočajo različne poglede na obravnavano problematiko. Za vsebinsko pravilno interpretacijo rezultatov je nujno, da opazujemo vpliv spremembe posamičnega parametra na sistem izolirano od sprememb drugih parametrov. Simulacije izvajamo s pomočjo Excelovih preglednic, ki so primerno in pregledno orodje za vnos matričnih struktur razširjene teorije materialnih potreb in s katerimi izvajamo ustrezne kalkulacije. V zaključnem delu podpoglavja predstavljamo aplikacijo teorije na konkretnem primeru španskega podjetja, ki se ukvarja s proizvodnjo hrane. S tem na poenostavljenem primeru prikažemo nekatere praktične možnosti aplikacije razširjene teorije planiranja materialnih potreb.

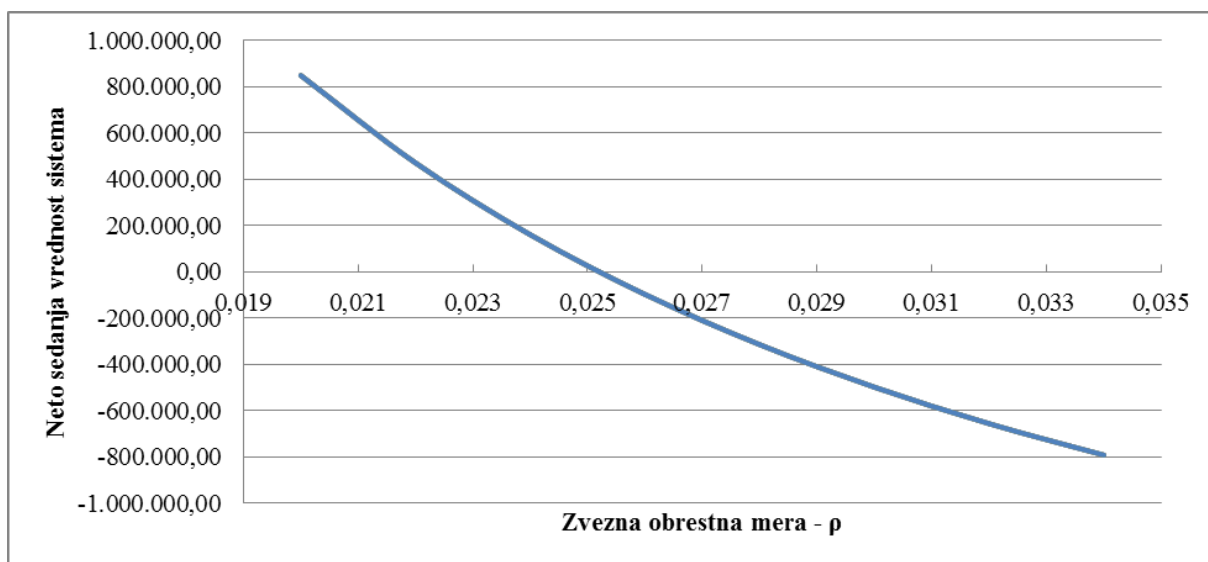
3.4.1 Proučevanje na podlagi numeričnega primera

V nadaljevanju tega podpoglavja izvajamo simulacije na numeričnem primeru iz podpoglavij 3.1.4, 3.1.6 in 3.1.8. Kot inicialno stanje uporabimo vrednosti iz podpoglavja 3.1.8, pri čemer kot vhodno-izhodni parameter upoštevamo tudi energijo. Inicialna neto sedanja vrednost sistema je $-498.127,52$ pri zvezni obrestni meri $\rho = 0,030$. Na Sliki 25 prikazujemo dinamiko spreminjanja neto sedanje vrednosti sistema ob spreminjanju zvezne obrestne mere ρ .

Znižanje zvezne obrestne mere vodi k zvišanju neto sedanje vrednosti celotne oskrbovalne verige. Pri višjih zveznih obrestnih merah pa je višji strošek kapitala, kar ima negativen vpliv na celotno neto sedanjo vrednost sistema. Diskontirana vrednost vseh prihodkov se znižuje s povečevanjem zvezne obrestne mere; v trenutku, ko diskontirana vrednost vseh prihodkov pade pod diskontirano vrednost vseh obravnavanih stroškov sistema, začne ta ustvarjati izgubo.

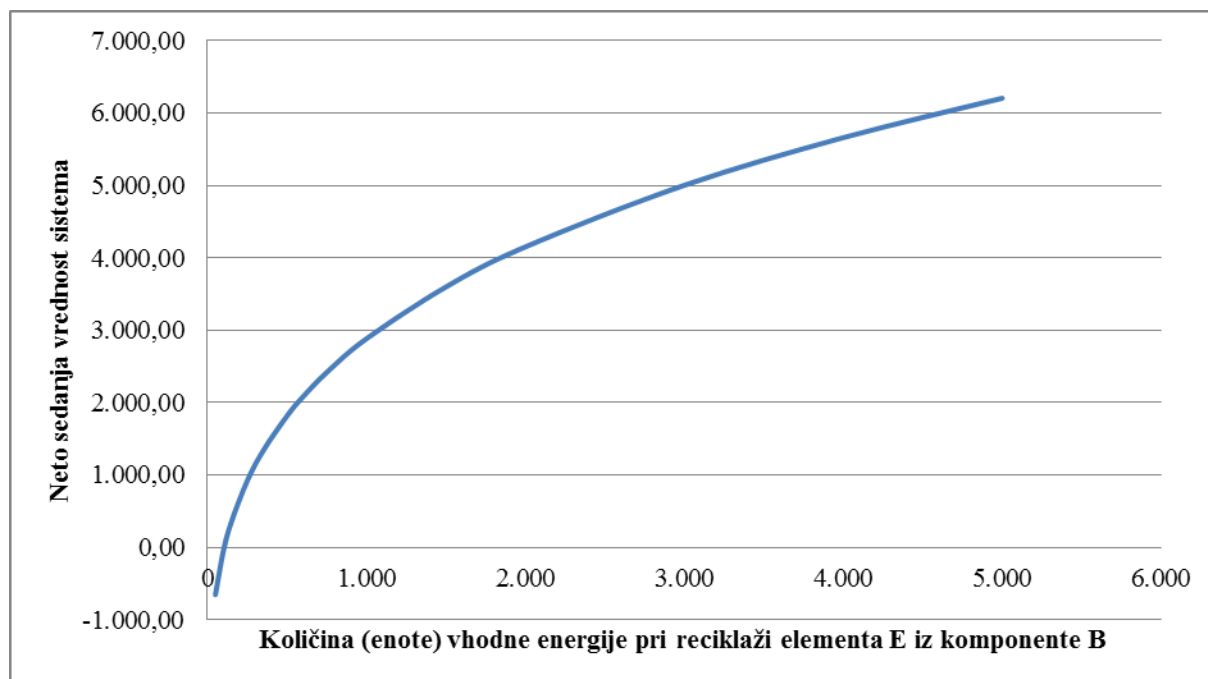
Da dosežemo pozitivno inicialno stanje neto sedanje vrednosti, v nadaljnjih simulacijah zvezno obrestno mero $\rho = 0,030$ nadomestimo z $\rho = 0,025$. Izhodiščna neto sedanja vrednost proučevane oskrbovalne verige tako naraste na 26.368,94.

Slika 25: Vpliv višine obrestne mere na neto sedanjo vrednost celotnega sistema

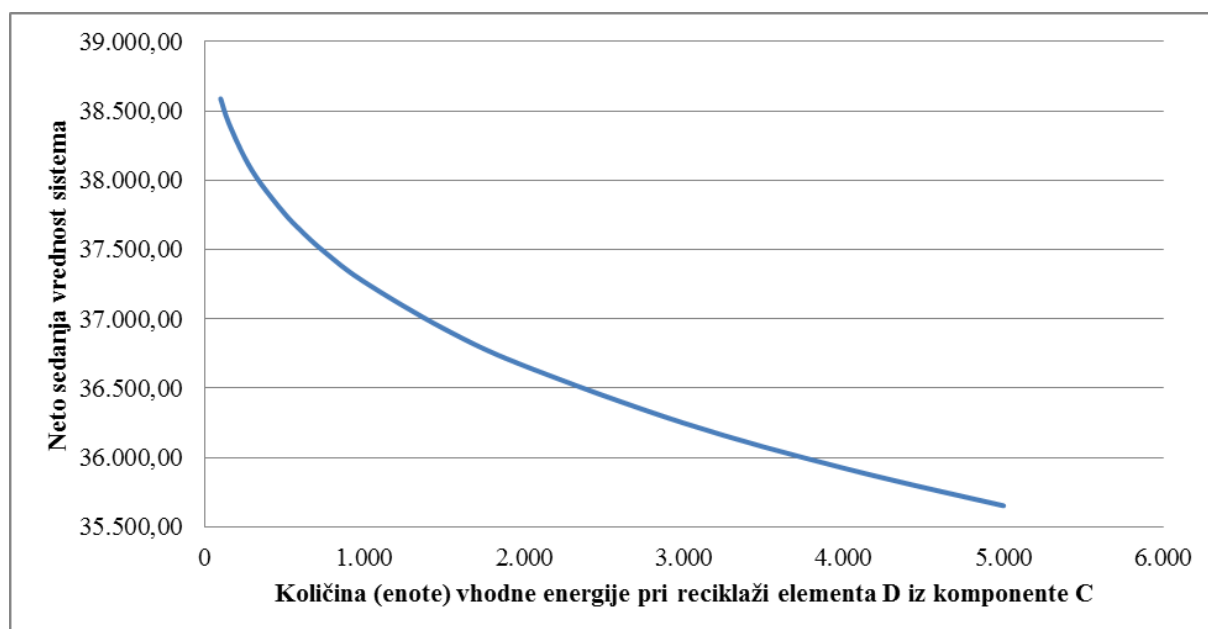


Tudi povečanje vhodne količine energije pri izvajanju reciklažnih procesov lahko vpliva na neto sedanjo vrednost celotnega sistema pozitivno ali negativno. To prikazujemo na slikah 26 in 27 na primeru reciklaže elementa E iz komponente B oziroma elementa D iz komponente C. Večji vložek energije praviloma poveča količino recikliranih elementov, manjša količina odpadnih elementov pa vpliva na znižanje kumulativnih plačil ekoloških dajatev. Kadar prihranki pri plačilih okoljskih dajatev presegajo stroške dodatno uporabljene energije, lahko pričakujemo porast neto sedanje vrednosti sistema, saj so akterji oskrbovalnih verig ustrezno stimulirani za doseganje višjih stopenj reciklaže (Slika 26). V primeru visokih cen energentov pa prihranki pri okoljskih dajatvah ne pokrijejo dodatnih stroškov energije (Slika 27). V tem primeru lahko upravljavci celic aktivnosti poizkušajo drago energijo nadomestiti s povečanjem vložka delovne sile. Kadar je cena delovne sile nizka, njena produktivnost pa visoka, lahko dosežemo podoben učinek, kot ga prikazujemo na Sliki 26 za razmere z relativno poceni energijo.

Slika 26: Zvišanje neto sedanje vrednosti sistema v primeru povečevanja vhodne energije pri reciklaži elementa E iz komponente B



Slika 27: Upad neto sedanje vrednosti sistema v primeru povečevanja vhodne energije pri reciklaži elementa D iz komponente C pri višini okoljskih dajatev – 5



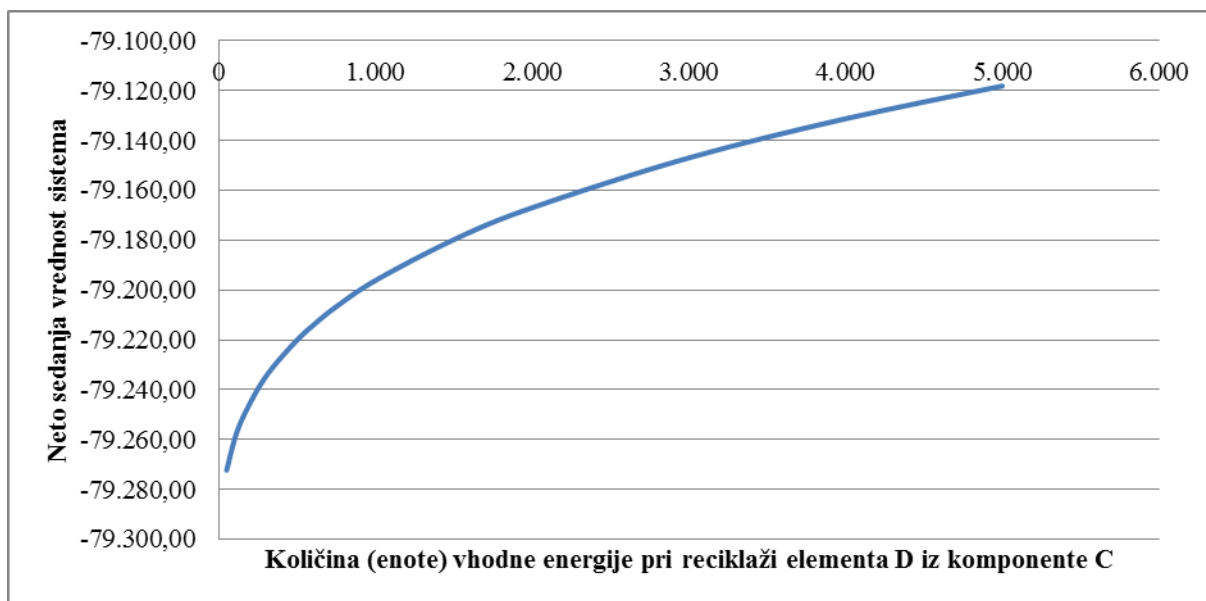
Do razlik med različnimi elementi sistema lahko prihaja tudi zaradi kompleksnosti njihove strukture in posledično zahtevnosti postopka razstavljanja. V konkretnem primeru lahko predpostavimo, da je za reciklažo ene enote elementa E iz komponente B potreben manjši

vložek količine energije kot za reciklažo ene enote elementa D iz komponente C. Za dosego ustreznega ekonomsko-okoljskega ravnotežja lahko z vidika globalne oskrbovalne verige proučimo možnost prestavitve reciklažnega obrata na lokacijo z bolj stimulativnim reciklažnim okoljem, s čimer lahko celo povečamo dobičkonosnost sistema. Druga možnost je povečanje okoljskih dajatev, s čimer vplivamo na povečanje stopenj reciklaže, vendar bo skupna neto sedanja vrednost sistema na tak način praviloma upadla.

Vpliv morebitnega povišanja okoljskih dajatev simuliramo na Sliki 28. Pri reciklaži elementa D iz komponente C ima dvig okoljskih dajatev z inicialne stopnje – 5 (Slika 27) na novo raven v višini – 9 dva pomembna vpliva na oskrbovalno verigo:

- 1) Za akterje oskrbovalne verige predstavljajo okoljske dajatve strošek, zato se njihovo zvišanje odrazi v znižanju neto sedanje vrednosti sistema.
- 2) Akterji oskrbovalne verige si prizadevajo uravnotežiti znižanje neto sedanje vrednosti sistema. To lahko dosežejo s povečevanjem vhodne energije v podsistem reciklaže, saj je strošek dovedene energije nižji od stroškov zvišanih okoljskih dajatev.

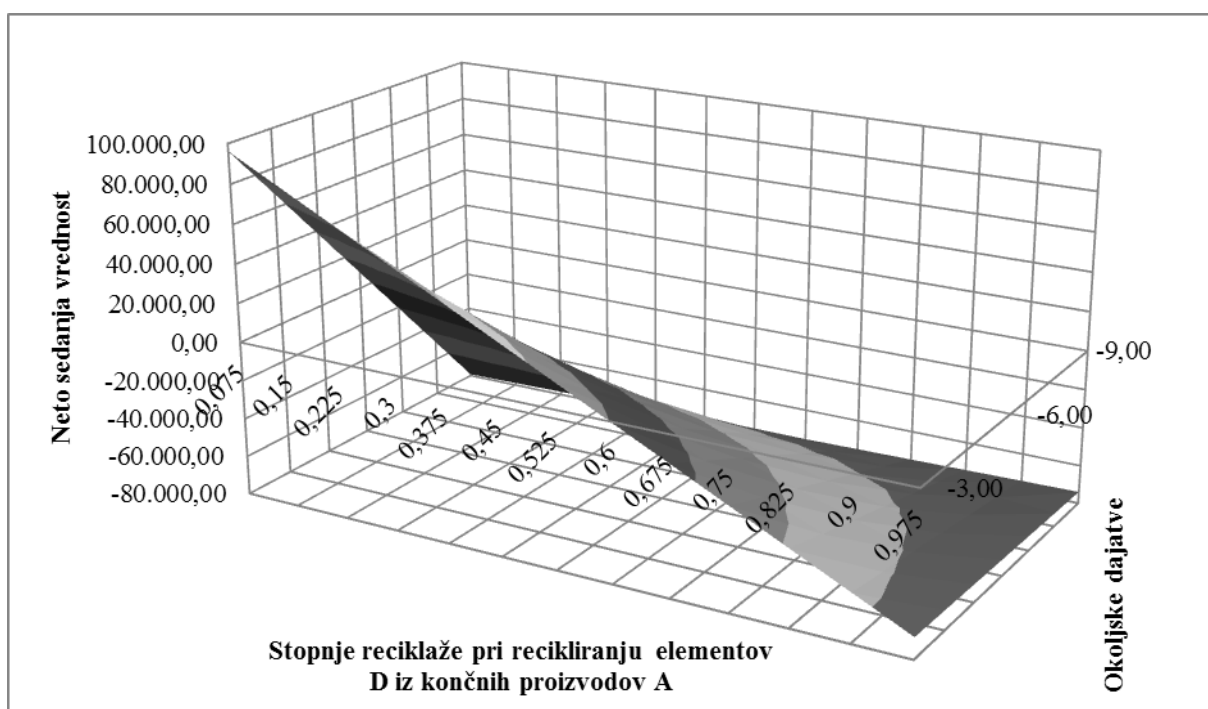
Slika 28: Zvišanje neto sedanje vrednosti sistema v primeru povečevanja vhodne energije pri reciklaži elementa D iz komponente C pri višini okoljskih dajatev – 9



Kljub temu da zvišanje okoljskih dajatev prisili posamične akterje oskrbovalne verige k povečanju reciklažnih aktivnosti (sliki 27 in 28), s takšnim ukrepom upade neto sedanja vrednost sistema kot celote. Radikalno zviševanje okoljskih obdavčitev lahko pripelje do stanja, v katerem sistem ni več dobičkonosen (Slika 28) ali konkurenčen na globalnih trgih, četudi dvignemo stopnje reciklaže do zgornje meje tehnoloških zmožnosti. Takšna situacija z ekonomskega vidika dolgoročno ni vzdržna, v skrajnem primeru pa lahko vodi celo v propad oziroma ukinitvev posamične oskrbovalne verige. Uravnotežena obdavčitev igra torej ključno vlogo pri iskanju ekonomsko-okoljskega ravnotežja, ne pa tudi edine. Pomembno je namreč,

da proizvajalci že v fazi načrtovanja izdelkov uporabijo tehnologije, ki znižujejo vložke energije, dela in kapitala, ki so potrebni za izvedbo reciklažnih aktivnosti. Na ta način znižajo negativne vplive okoljskih dajatev na ekonomičnost celotnega sistema, zmanjšajo negativne vplive oskrbovalne verige na okolje in prispevajo k dolgoročni vzdržnosti ekonomsko-družbenega okolja.

Slika 29: Vpliv spreminjajočih se okoljskih dajatev in zahtevanih stopenj reciklaže na neto sedanjo vrednost sistema, kadar reciklaža ni ekonomsko smotrna (reciklaža D iz A)



Izolirani vpliv sprememb stopenj reciklaže in okoljskih dajatev na neto sedanjo vrednost sistema razberemo iz slik 29, 30 in 31, pri čemer ločimo dve situaciji:

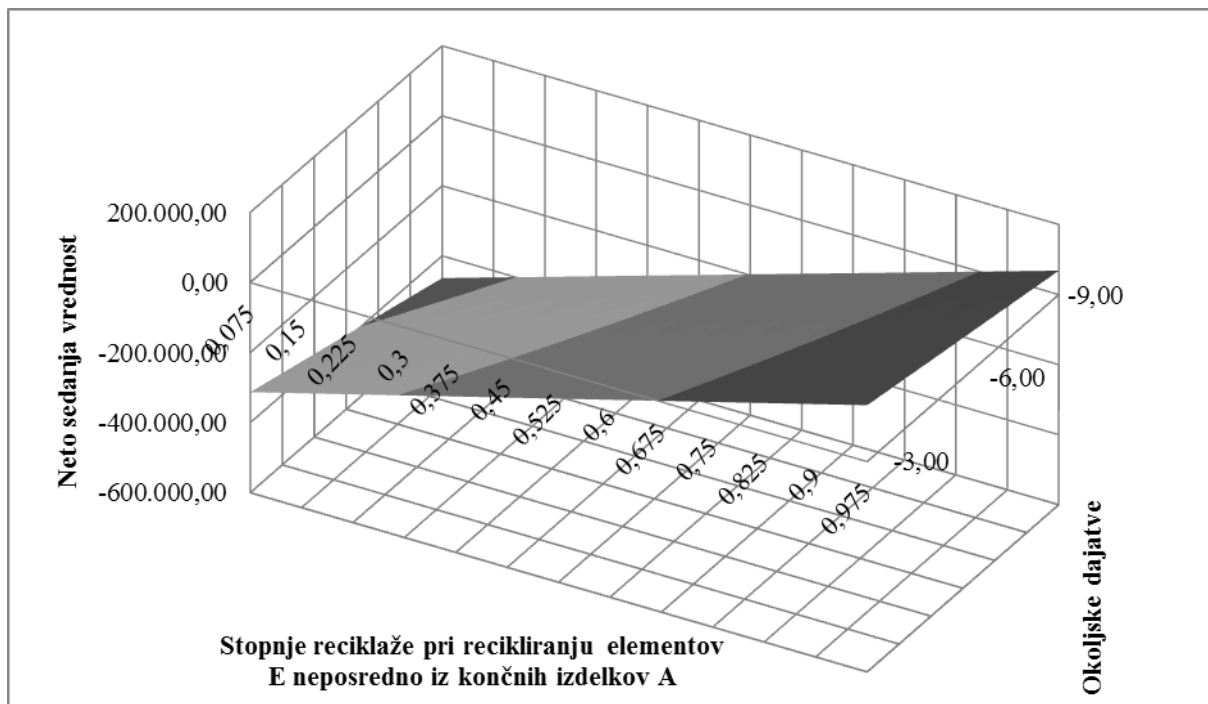
- 1) Recikliranje na določenem mikro nivoju ni ekonomsko smotrno (Slika 29). Akterji oskrbovalne verige torej niso motivirani za povečevanje reciklažnih aktivnosti. Oskrbovalna veriga v takšnih razmerah ustvarja največji dobiček takrat, ko opusti reciklažo, hkrati pa so okoljske dajatve nizke. Povečanje reciklažnih aktivnosti namreč vodi v znižanje neto sedanje vrednosti sistema, zato so za premik k okoljsko sprejemljivejšemu ravnanju posamičnih celic aktivnosti potrebni zunanji impulzi. Pri nizkih stopnjah reciklaže najizraziteje znižuje neto sedanjo vrednost povečanje okoljskih dajatev, pri visokih stopnjah reciklaže pa postane vpliv okoljskih dajatev zanemarljiv. Pri nizkih stopnjah reciklaže lahko namreč s povečanjem okoljske obdavčitve, ki premakne neto sedanjo vrednost sistema v negativno območje, vzpodbudimo akterje k spremembi strukture oskrbovalne verige, saj bodo stremeli k njeni ponovni ekonomski učinkovitosti. Rezultat bodo tehnološke in organizacijske

prilagoditve proizvodnih in reciklažnih aktivnosti, spremembe prostorske razporeditve celic aktivnosti ter povečanje vložkov v raziskave in razvoj. Učinkovit ukrep za zmanjševanje okoljskih vplivov oskrbovalnih verig je tudi zakonska določitev ciljnih stopenj reciklaže. Ta ukrep je za nosilce okoljske politike primeren predvsem pri že vzpostavljenem sistemu reciklaže, ko je vpliv okoljskih obdavčitev nižji in želimo še dodatno povečati relativno visoke stopnje reciklaže.

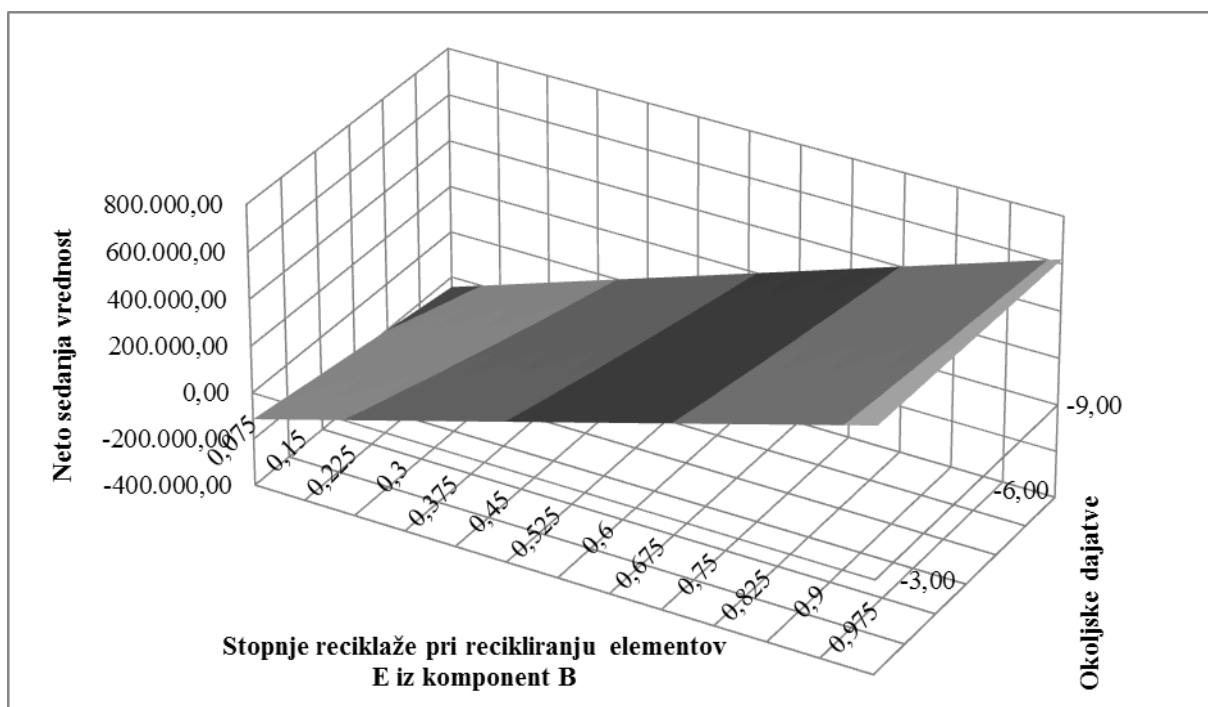
- 2) Recikliranje na določenem mikro nivoju je ekonomsko smotno (sliki 30 in 31). V takšni oskrbovalni verigi so vzpostavljene razmere, v katerih je reciklaža ekonomsko smotna brez dodatnih intervencij okoljske politike. Običajno gre za visokotehnološka okolja, v katerih so reciklažne aktivnosti že na visoki stopnji razvitosti in dosegajo visoko stroškovno učinkovitost. Vhodni elementi sistema (primarne surovine ali reciklirane komponente) so v naravi redki ali pa je njihovo pridobivanje težavno in povezano z visokimi stroški, zato je njihova ponovna uporaba ključna za kratko- in srednjeročno zadovoljevanje potreb končnih potrošnikov. V takšnih razmerah je dodatno vzpodbujanje reciklažnih aktivnosti z okoljskimi dajatvami relativno neuspešno. Uporabne so predvsem kot učinkovito orodje za povečanje reciklažnih aktivnosti v primeru nizke pozitivne neto sedanje vrednosti. Povečanje namreč premakne neto sedanjo vrednost sistema v negativno območje, s čimer dosežemo reorganizacijo oskrbovalne verige, ki premakne neto sedanjo vrednost sistema v pozitivno območje. Z manjšimi kontinuiranimi povečevanji okoljskih dajatev lahko torej takšne oskrbovalne verige konstantno silimo k prehodu na višje ravni reciklaže. Kadar so reciklažne aktivnosti ekonomsko smotne, pa je njihovo izvajanje bolj kot z dvigom okoljskih dajatev smiselno vzpodbujati z zakonsko določenimi stopnjami reciklaže. Ker je že vzpostavljeno okolje, v katerem so reciklažne aktivnosti smotne, lahko na tak način dosežemo hitrejšo prilagoditev oskrbovalnih, s tem pa povečanje ponovne uporabe in družbo z manjšo količino odpadkov.

V obeh zgoraj opisanih situacijah je bistveno, da so ukrepi za povečevanje ekonomsko-okoljskega ravnotežja sorazmerni s stopnjo tehnološke razvitosti gospodarskega okolja. Nesorazmerni ukrepi, ki jim tehnologija ni sposobna slediti, lahko vodijo v takšno znižanje neto sedanje vrednosti, da oskrbovalna veriga ni več ekonomsko smotna.

Slika 30: Vpliv spreminjajočih se okoljskih dajatev in zahtevanih stopenj reciklaže na neto sedanjo vrednost sistema, kadar je reciklaža ekonomsko smotrna (reciklaža E iz A)



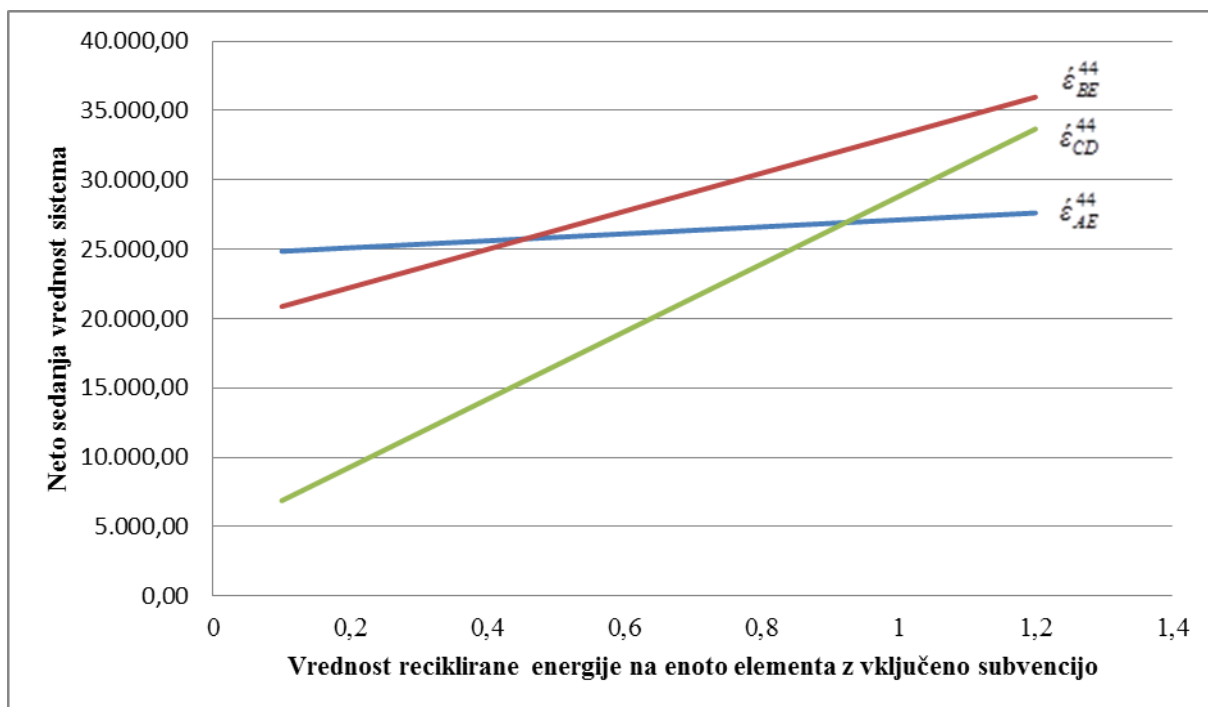
Slika 31: Vpliv spreminjajočih se okoljskih dajatev in zahtevanih stopenj reciklaže na neto sedanjo vrednost sistema, kadar je reciklaža ekonomsko smotrna (reciklaža E iz B)



Politika lahko s subvencioniranjem aktivno vpliva na odkupne cene reciklirane energije. Na Sliki 32 prikazujemo dvig odkupnih cen enote energije p_{ji}^E za 3 reciklažne tokove

numeričnega primera. Dvig odkupnih cen električne energije se odrazi v višjih prihodkih $\dot{\epsilon}_{AE}^{44}$, $\dot{\epsilon}_{BE}^{44}$ in $\dot{\epsilon}_{CD}^{44}$ z naslova reciklirane energije na eno enoto elementa. Pri simulaciji na Sliki 32 predpostavljamo, da je količina reciklirane energije konstantna. Opazimo lahko, da subvencije pri različnih tokovih reciklaže različno prispevajo k rasti neto sedanje vrednosti sistema. Recikliranje energije v celici aktivnosti, v kateri razgrajujemo komponento C na elemente D, je cenovno veliko bolj občutljivo kot recikliranje energije pri razgradnji končnega proizvoda A na elemente E. Pri slednjem namreč opazimo, da relativno veliko povečanje odkupne cene enote energije minimalno vpliva na skupno neto sedanjo vrednost sistema kot celote, kar je povezano s količino celotne reciklirane energije posamičnega reciklažnega toka in stroški, ki se pojavijo pri reciklaži energije znotraj tega toka. Kadar so količine reciklirane energije nizke, stroški njenega pridobivanja pa visoki, bo torej vpliv subvencij bistveno nižji kot v primeru nizkih stroškov in enostavnega recikliranja večjih količin energije. Pri sprejemanju odločitev o subvencioniranju odkupa reciklirane energije je odgovornost politike, da pravilno identificira tiste celice aktivnosti, v katerih imajo tovrstne podpore največji učinek. Alternativni pristop k pospeševanju investicij v povratno pridobivanje energije je zato lahko tudi neposredno sofinanciranje investicij v infrastrukturo tistih celic aktivnosti, v katerih bo korist največja.

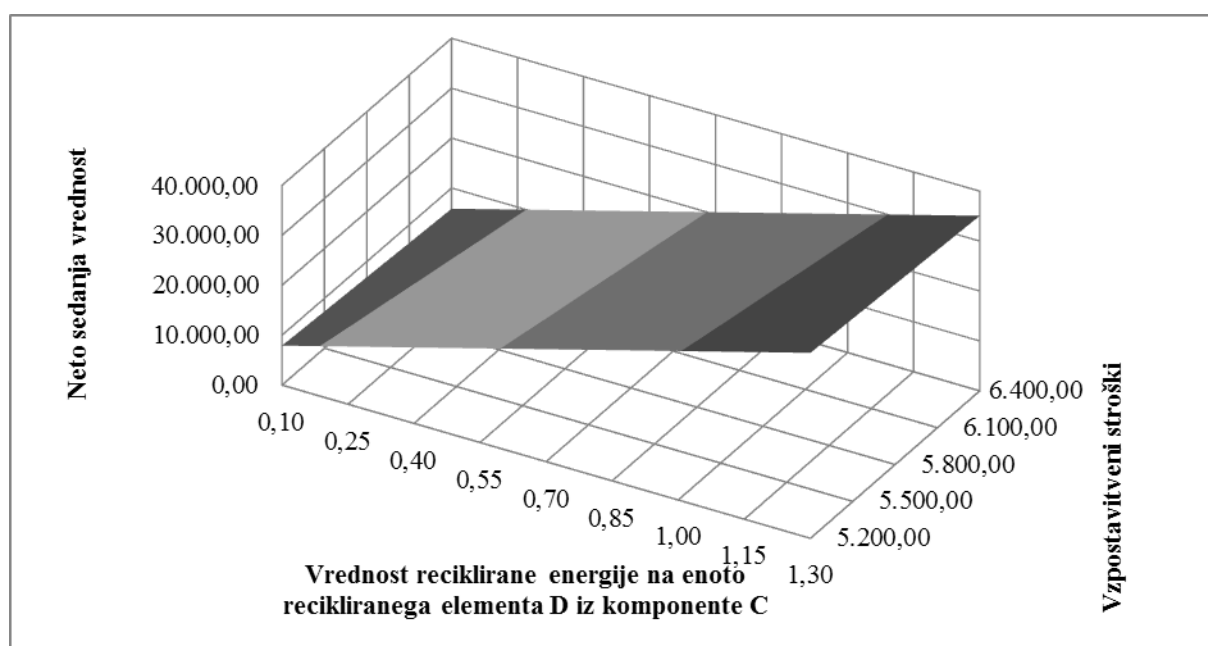
Slika 32: Vpliv subvencionirane odkupne cene na neto sedanjo vrednost za posamično reciklažno celico aktivnosti



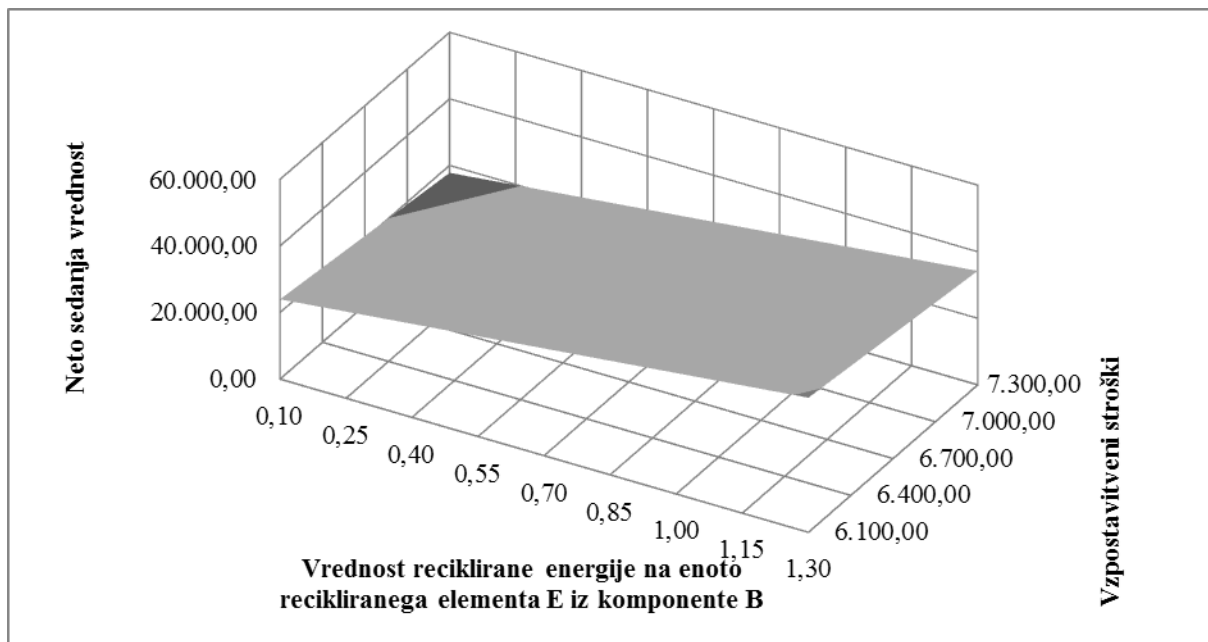
Poleg vključitve subvencioniranih odkupnih cen, ki so zajete znotraj p_{ji}^E (Slika 32), je mogoče povečanje vrednosti reciklirane energije $\dot{\epsilon}_{ji}^G = p_{ji}^E \dot{\epsilon}_{ji}^G$ doseči tudi s povečanjem

količine reciklirane energije $\dot{E}_{ji}^G$, ki jo pridobivamo na najnižjem nivoju posamičnega reciklažnega toka $j \rightarrow i$. Večja količina reciklirane energije namreč zviša neto sedanjo vrednost prihodkov, ki so povezani s prodajo tako pridobljene energije na trgu. Povečanje reciklaže pa običajno zahteva investicije v primerno infrastrukturo, ki omogoča večje kapacitete reciklirane energije. Te investicije lahko proučujemo preko vzpostavitev stroškov. Kadar dodatni prihodki reciklirane energije presegajo investicijske stroške (zvišanje neto sedanje vrednosti celotnega sistema), je povečanje reciklaže energije ekonomsko upravičeno. Na slikah 33, 34 in 35 prikazujemo dovoljena območja, znotraj katerih lahko sprejemamo odločitve pri reciklaži na posamičnih reciklažnih tokovih $C \rightarrow D$, $B \rightarrow E$ in $A \rightarrow E$. Variabilni stroški reciklaže na nivoju $C \rightarrow D$ (Slika 33) so nižji od variabilnih stroškov na nivojih $B \rightarrow E$ (Slika 34) in $A \rightarrow E$ (Slika 35), število vhodnih komponent, iz katerih lahko pridobivamo energijo, pa je večje, zato je na nivoju $C \rightarrow D$ ob povečevanju količine in posledično vrednosti reciklirane energije porast neto sedanje vrednosti na razstavljeni element večji kot na nivojih $B \rightarrow E$ in $A \rightarrow E$. Opazimo lahko torej, da je smotrnost investiranja v tehnološki razvoj bistveno večja, kadar se povečanje količine (in posledično vrednosti) reciklirane energije na nivoju najnižjega toka reciklaže izrazito odrazi v dvigu celotne neto sedanje vrednosti sistema (primer na Sliki 33). Porast skupne neto sedanje vrednosti je višji kot porast vzpostavitev stroškov, zato je ekonomsko smotrno območje znotraj ploskve dovoljenih odločitev večje kot v situacijah, ko je porast neto sedanje vrednosti nižji kot porast vzpostavitev stroškov (sliki 34 in 35). Kadar je kljub izrazitemu povečanju vrednosti reciklirane energije njen vpliv na skupno neto sedanjo vrednost majhen (Slika 35), hkrati pa je vpliv investicij velik, je ekonomsko smotrno območje znotraj ploskve dovoljenih odločitev zelo omejeno.

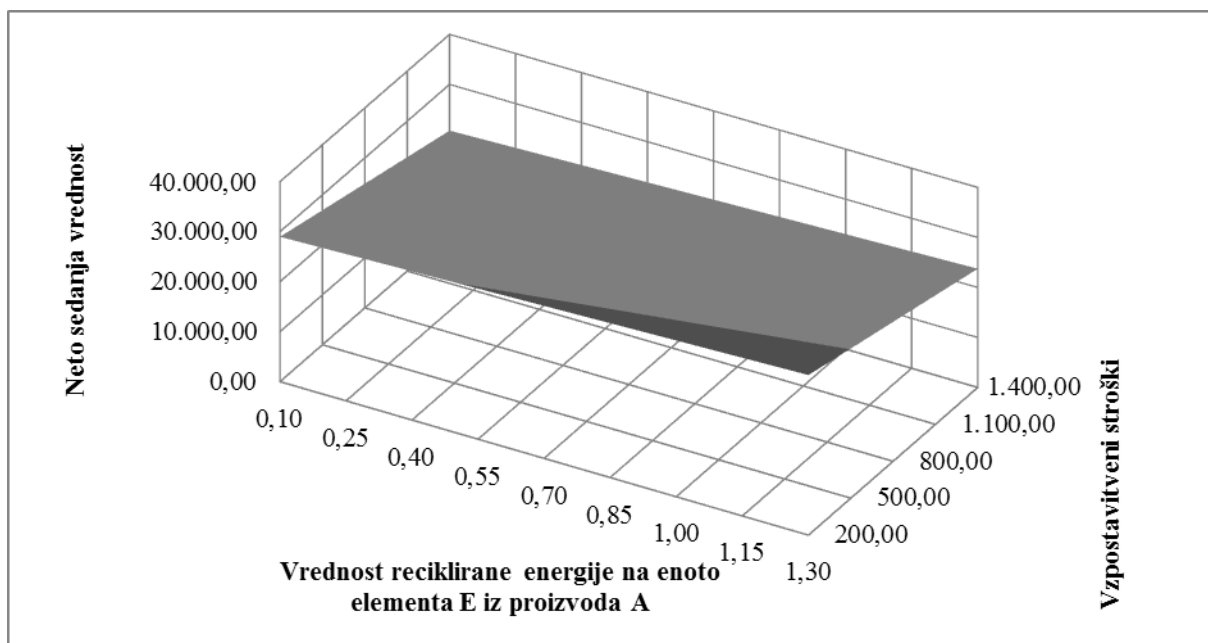
Slika 33: Dovoljeno območje odločitev med višino investicij in količino (vrednostjo) reciklirane energije na reciklažnem nivoju $C \rightarrow D$



Slika 34: Dovoljeno območje odločitev med višino investicij in količino (vrednostjo) reciklirane energije na reciklažnem nivoju B → E



Slika 35: Dovoljeno območje odločitev med višino investicij in količino (vrednostjo) reciklirane energije na reciklažnem nivoju A → E

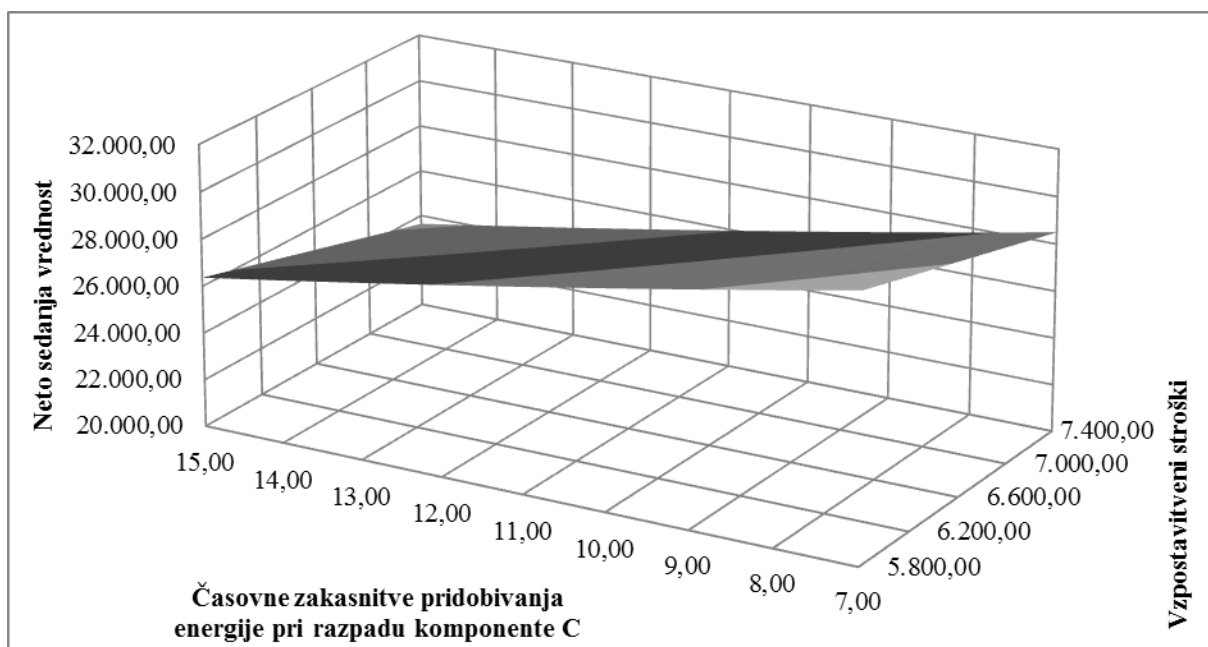


Poleg povečevanja vrednosti reciklirane energije lahko pozitivne ekonomske učinke dosežemo tudi s skrajševanjem časovnih zakasnitev, do katerih prihaja pri izvajanju postopkov povratnega pridobivanja energije znotraj posamičnega reciklažnega toka (slike 36, 37 in 38). Z investicijami v razvoj tehnoloških postopkov lahko namreč pospešimo razpadanje

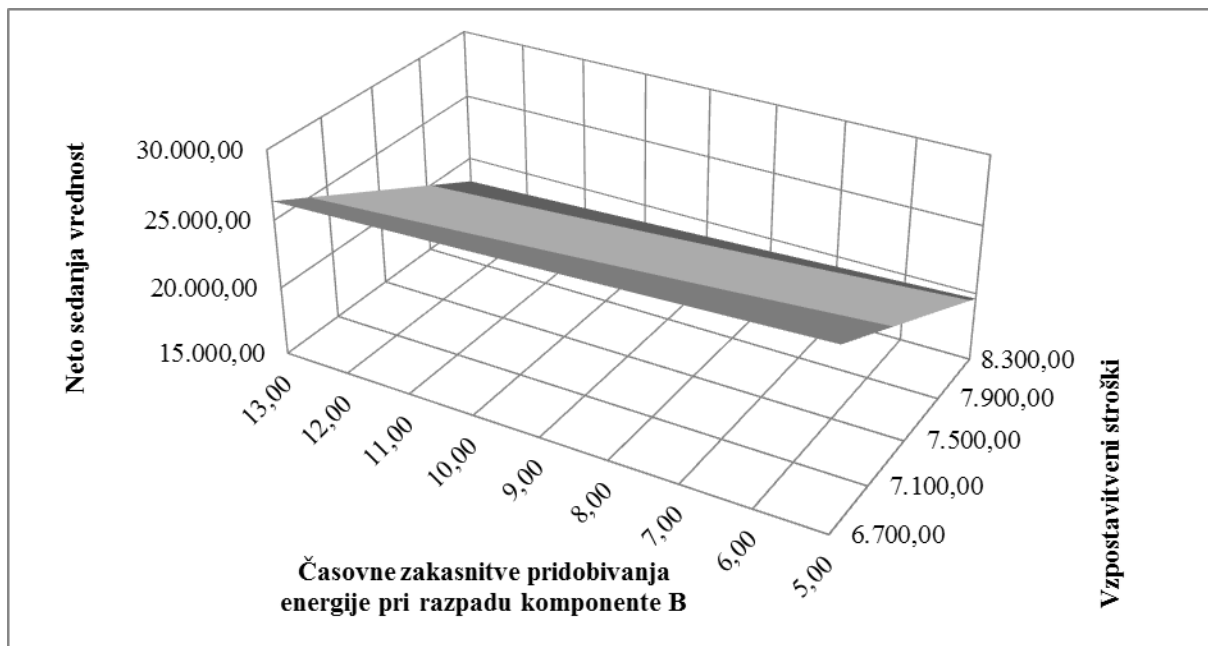
odpadnih elementov in posledično povratno pridobivanje energije (npr. s sežiganjem namesto z biološko razgradnjo, s kemičnimi postopki za pospešitev biološke razgradnje odpadnih elementov ipd.). S tem dosežemo hitrejšo ponovno razpoložljivost energije in posledično povečanje njene neto sedanje vrednosti, kar pozitivno vpliva na neto sedanjo vrednost celotne oskrbovalne verige.

Pri interpretaciji rezultatov pridemo do podobnih zaključkov kot pri obravnavi investicij v povečanje količine (oz. vrednosti) enote reciklirane energije (slike 33, 34 in 35). Kadar je neto prihodek reciklirane energije z upoštevanjem variabilnih stroškov sorazmerno visok (Slika 36), je ekonomsko bistveno bolj smotrno investirati v pospešitev njenega pridobivanja kot v primerih, ko je njen neto prihodek nižji (slike 37 in 38). V primeru zelo nizkega neto prihodka z naslova reciklirane energije (Slika 38) je območje ekonomske smotrnosti pospešitve povratnega pridobivanja zelo omejeno; investicija je torej v večini primerov nesmiselna. V takšnih primerih je racionalneje investirati v znižanje variabilnih stroškov, s čimer se poveča neto prihodek reciklirane energije. Prav tako je v tovrstnih primerih racionalneje investicijska sredstva nameniti izboljšanju infrastrukture v tistih celicah aktivnosti, v katerih dosežemo boljše rezultate na enoto investiranih sredstev – tam, kjer je naklon ploskve bolj strm (Slika 36).

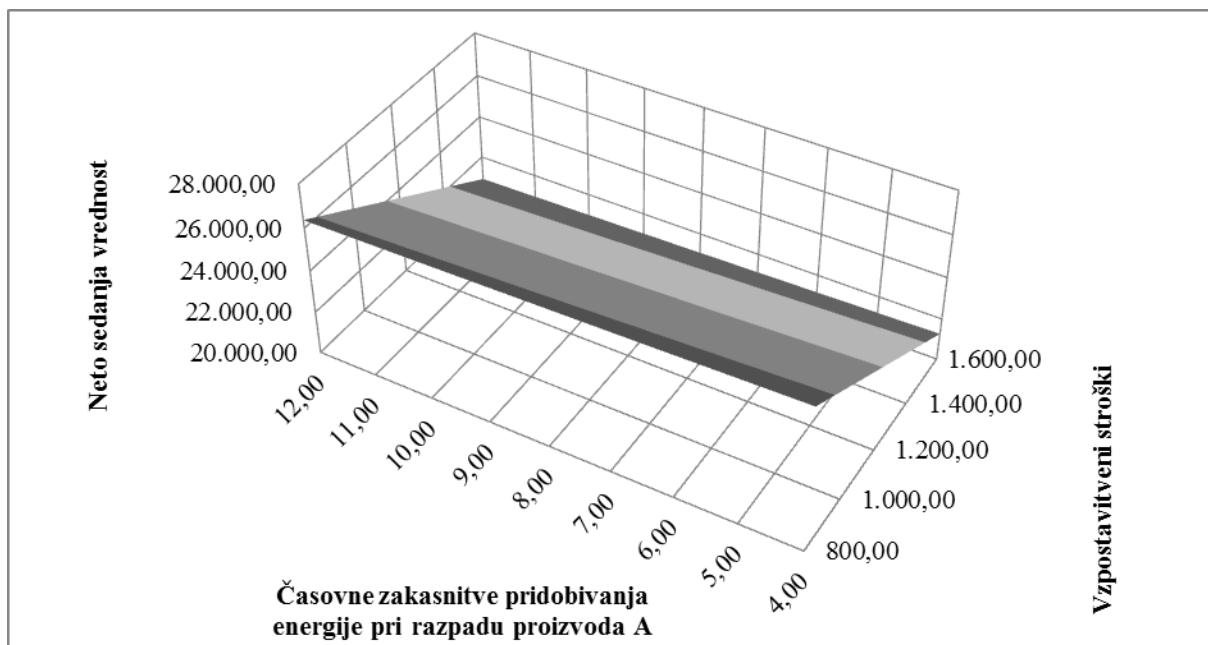
Slika 36: Vpliv investicij na skrajševanje časovnih zakasnitev pridobivanja energije iz odpadnih komponent (razpad komponente C)



Slika 37: Vpliv investicij na skrajševanje časovnih zakasnitev pridobivanja energije iz odpadnih komponent (razpad komponente B)



Slika 38: Vpliv investicij na skrajševanje časovnih zakasnitev pridobivanja energije iz odpadnih komponent (razpad proizvoda A)

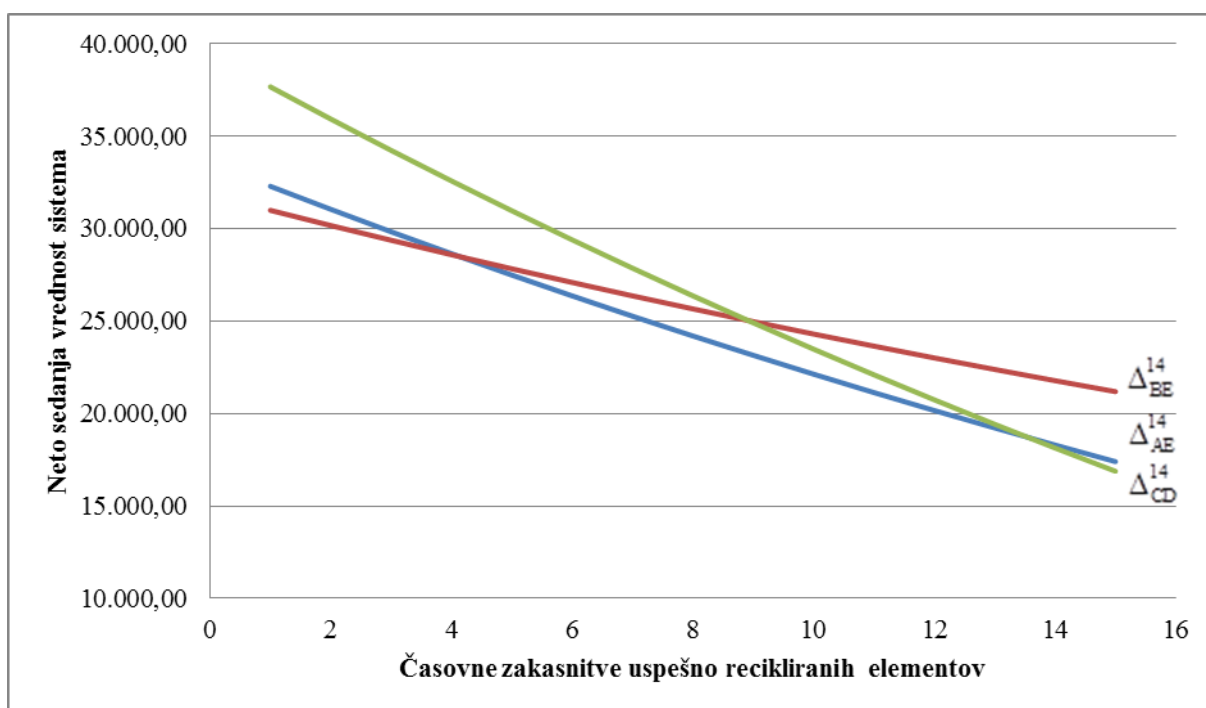


Proces reciklaže in distribucije uspešno recikliranih elementov nazaj v proizvodne obrate, kjer jih uporabimo v ponovnem ciklu, povzroča časovne zakasnitve. Znižanje časovnih zakasnitev pa ima praviloma pozitivne učinke na neto sedanjo vrednost sistema (Slika 39). Pozitivni učinki so posledica hitrejšega vstopa elementov v nov cikel, s čimer znižamo ceno kapitala,

vezanega v zalogah teh elementov na poti od reciklažnih skladišč nazaj do proizvodnih skladišč. Pri elementih, ki so v naravi redkejši ali pa je njihovo primarno pridobivanje težavno (kar se odraža v višjih cenah na primarnem trgu surovin), lahko pričakujemo bolj strm naklon krivulje; na Sliki 39 je tak primer element D s časovno zakasnitvijo Δ_{CD}^{14} . Po drugi strani ima skrajšanje časovnih zakasnitev večji vpliv pri tistih elementih, ki jih uspešno recikliramo v večji količini, torej je njihov vhodni kontingent iz reciklaže v proizvodnjo večji. V primeru dviga stopnje reciklaže za posamični element se tako spremeni tudi naklon njegove krivulje, ki predstavlja odvisnost neto sedanje vrednosti sistema od časovnih zakasnitev vračanja elementov. To lahko opazujemo na sliki 39 na elementu E, ki ga recikliramo po dveh poteh:

- 1) pri recikliranju iz končnih proizvodov A dosegamo višje stopnje reciklaže in večje končne količine recikliranih elementov E, posledično je naklon krivulje bolj strm,
- 2) pri recikliranju iz komponente B dosegamo nižje stopnje reciklaže in manjšo celotno končno količino recikliranih elementov E, posledično je naklon krivulje bolj položen.

Slika 39: Vpliv časovnih zakasnitev uspešno recikliranih elementov na neto sedanjo vrednost sistema

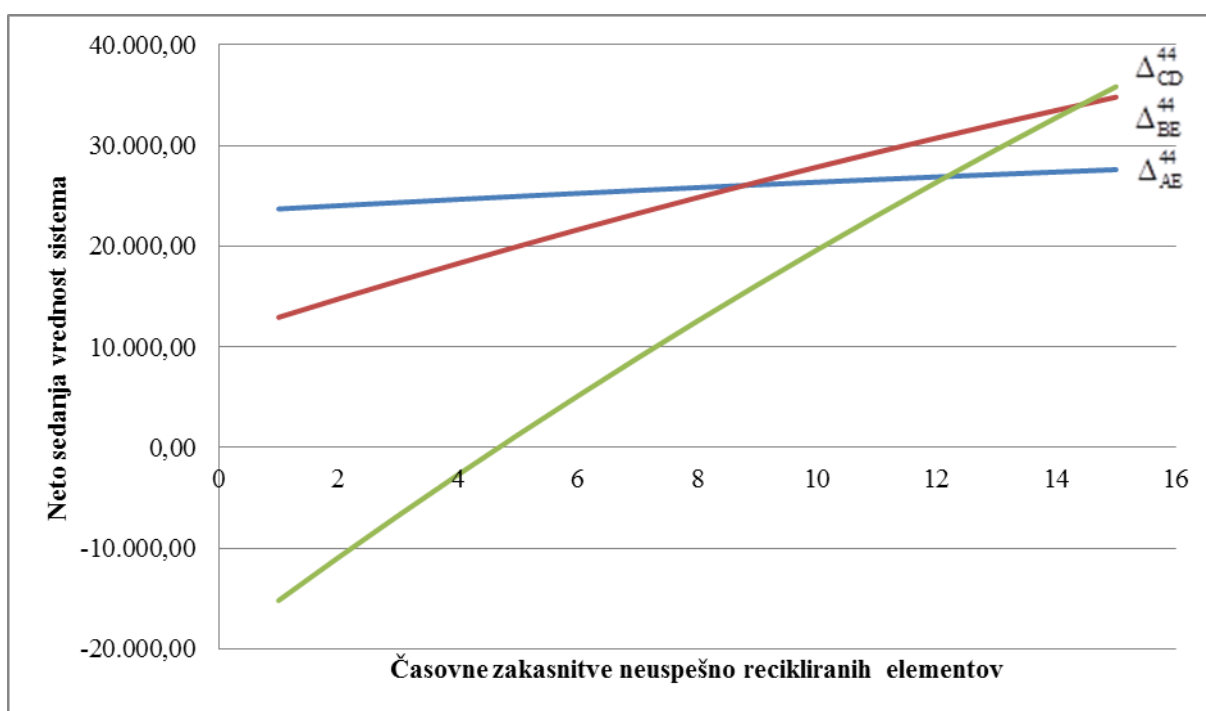


Vpliv časovnih zakasnitev v tej simulaciji opazujemo izolirano od drugih vplivov. Če želimo doseči skrajšanje časovnih zakasnitev, je seveda treba ustrezno reorganizirati oskrbovalno verigo, s čimer pa se spremeni tudi vpliv drugih parametrov na izračun neto sedanje vrednosti. Skrajšanje časovnih zakasnitev lahko namreč dosežemo z izboljšanjem tehnoloških postopkov razgradnje ali optimizacijo transportnih poti, kar se odrazi tudi v povišanju stroškov. Kadar ti stroški presegajo pozitivni doprinos skrajšanja časovnih zakasnitev, so tovrstne investicije ekonomsko neupravičene. Zato je smiselna ustrezna analiza vpliva časovnih zakasnitev, saj

moramo prepoznati tiste elemente sistema, pri katerih se morebitne izboljšave najbolj odrazijo v dvigu njegove ekonomičnosti. Tu lahko potegnemo vzporednice s klasifikacijo zalog ABC (Winston, 1997):

- 1) Elementi, ki so v naravi redki ali je postopek njihovega pridobivanja zahteven, posledično dosegajo visoke tržne cene, njihova količina v sistemu pa je relativno visoka, imajo velik vpliv na ekonomičnost. Že z manjšimi spremembami lahko tako bistveno vplivamo na neto sedanjo vrednost celotne oskrbovalne verige. To so pomembni elementi (rang A), ki jim je smiselno posvečati največ pozornosti pri upravljanju celotne oskrbovalne verige (npr. element D iz predstavljenih simulacij).
- 2) Elementi, ki v naravi niso redki in so lažje dosegljivi, imajo na primarnem trgu surovin praviloma relativno nizko ceno. Če znotraj oskrbovalne verige kroži večje število takšnih elementov, imajo ti srednje velik vpliv na ekonomičnost celotnega sistema (rang B), ki ni zanemarljiv (npr. element E iz predstavljenih simulacij).
- 3) Elementi, ki v naravi niso redki, so lažje dosegljivi, njihovo število v sistemu pa je majhno, so z vidika proučevanja in optimizacije oskrbovalne verige relativno nepomembni (rang C).

Slika 40: Vpliv časovnih zakasnitev nerecikliranih elementov na neto sedanjo vrednost sistema

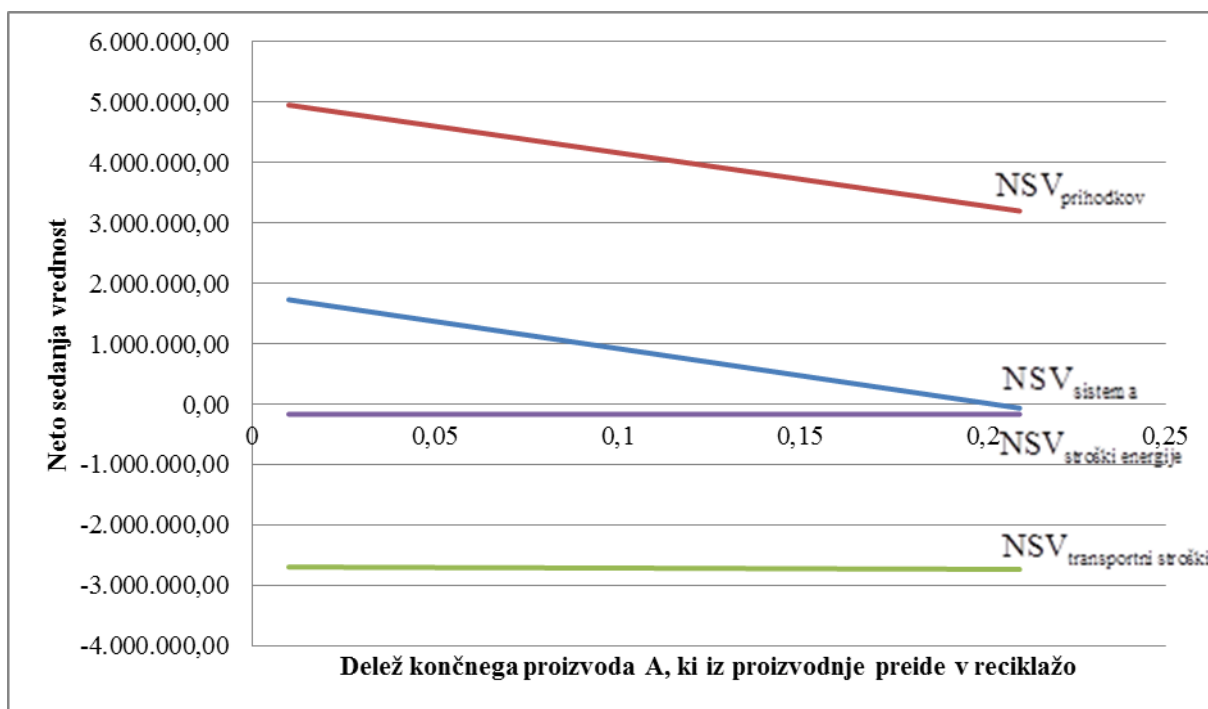


Za razliko od uspešno recikliranih elementov, za katere želimo, da vstopijo v nov proizvodni cikel v čim krajšem času, je treba odpadne elemente odložiti na deponijo in zanje plačati pripadajoče okoljske dajatve. Krajše časovne zakasnitve pri teh tokovih pomenijo, da je diskontirana vrednost stroška dajatev višja, kar ima negativen vpliv na celotno neto sedanjo

vrednost sistema (Slika 40). Pri teh tokovih zato z vidika posamičnih akterjev oskrbovalne verige ni smiselna optimizacija v smislu skrajševanja časovnih zakasnitev. Visoke obdavčitve lahko v primeru nesorazmerno visokih okoljskih dajatev vodijo celo do investiranja v lastne skladiščne kapacitete, kjer akterji oskrbovalnih verig hranijo odpadne elemente, s čimer dosežejo zakasnitev pri denarnem toku plačil okoljskih dajatev. Tovrstno ravnanje je zaradi neustreznega skladiščenja odpadkov z okoljskega vidika običajno sporno. Zato je naloga politike, da zagotovi uravnotežene okoljske dajatve, ki vzpodbujajo reciklažne aktivnosti in preprečujejo špekulativne transakcije, hkrati pa mora izvajati tudi ustrezen nadzor nad obnašanjem posamičnih akterjev oskrbovalne verige.

Z vidika proizvodnega procesa je pomembna kvaliteta končnih proizvodov, saj ta določa delež celotne proizvodnje, ki vstopi v distribucijski podsistem in nadalje v potrošni podsistem. V proučevanem numeričnem primeru predpostavljamo, da se 20 % končnih izdelkov izloči kot neposreden izpad proizvodnje. Iz Slike 41 sta razvidni sprememba deleža odpadnih končnih proizvodov A in njen vpliv na posamične sestavine končne neto sedanje vrednosti sistema.

Slika 41: Sprememba neto sedanje vrednosti prihodkov in stroškov v primeru zniževanja deleža končnih proizvodov A, ki iz proizvodnje preidejo neposredno v reciklažo



Zniževanje deleža odpadnih končnih proizvodov opazno zvišuje neto sedanjo vrednost vseh prihodkov, pri čemer se neto sedanji vrednosti transportnih stroškov in stroškov energije skoraj ne spreminjata. Element z najvišjo vrednostjo v sistemu je vedno končni proizvod, ki zadosti kakovostnim merilom in je primeren za distribucijo na trg. Njegova vrednost je pričakovano vedno višja od vrednosti posamičnih komponent oziroma tistih končnih

proizvodov, ki niso primerni za distribucijo na trg. Posledično lahko pričakujemo, da se že majhno povečanje ustreznih končnih proizvodov glede na neustrezne proizvode odrazi v izrazitem povečanju neto sedanje vrednosti prihodkov. Pri tem je sprememba neto sedanje vrednosti energije in transportnih stroškov običajno sorazmerno nizka v primerjavi z neto sedanjo vrednostjo prihodkov, zato je vpliv na končno neto sedanjo vrednost izrazito pozitiven.

Konstantnost stroškov energije in transportnih stroškov lahko pojasnimo z naslednjimi dejstvi:

- 1) Strošek energije, potrebne za reciklažo končnega proizvoda iz proizvodnje, je v realnem svetu primerljiv s stroškom energije v primeru reciklaže končnega proizvoda iz distribucije ali potrošnje. Tudi kadar to ne drži, lahko predpostavimo, da je razlika v ceni energije bistveno nižja od razlike v ceni prodaje dodatnih proizvodov na trgu; s tem pa ponovno izničimo opaznejši vpliv stroška energije. Takšna situacija je razvidna s Slike 41: v numeričnem primeru je namreč strošek energije, potrebne za reciklažo končnega proizvoda iz proizvodnje, približno 50 % višji kot strošek energije, potrebne za reciklažo izrabljenega proizvoda iz potrošnje. Razlika v ceni je lahko posledica različnih lokacij reciklažnih obratov, vpliv na skupno neto sedanjo vrednost pa je kljub temu zanemarljiv.
- 2) Do podobnih zaključkov pridemo tudi pri opazovanju transportnih stroškov. Ti se namreč spremenijo zaradi strukture distribucije: transport končnih proizvodov neposredno v reciklažo se zmanjša, poveča pa se distribucija v potrošnjo. Tudi kadar je med tema transportnima kanaloma velika razlika v stroških na enoto proizvoda, je ta v večini realnih primerov zanemarljiva v primerjavi z razliko, ki jo ustvarimo na enoto dodatnega proizvoda z njegovo prodajo na trgu. Takšno situacijo predpostavljamo tudi v numeričnem primeru in simulaciji na Sliki 41, iz katere je razvidno, da so distribucijski stroški kljub velikim cenovnim razlikam zanemarljivi, ko jih primerjamo z dodatno ustvarjenimi prihodki zaradi povečanja kvalitete proizvedenih končnih izdelkov.

Kadar bi se zniževanje deleža neustreznih končnih proizvodov v proizvodnji odrazilo v znižanju neto sedanje vrednosti sistema, bi bil tak sistem že v osnovi neekonomičen.

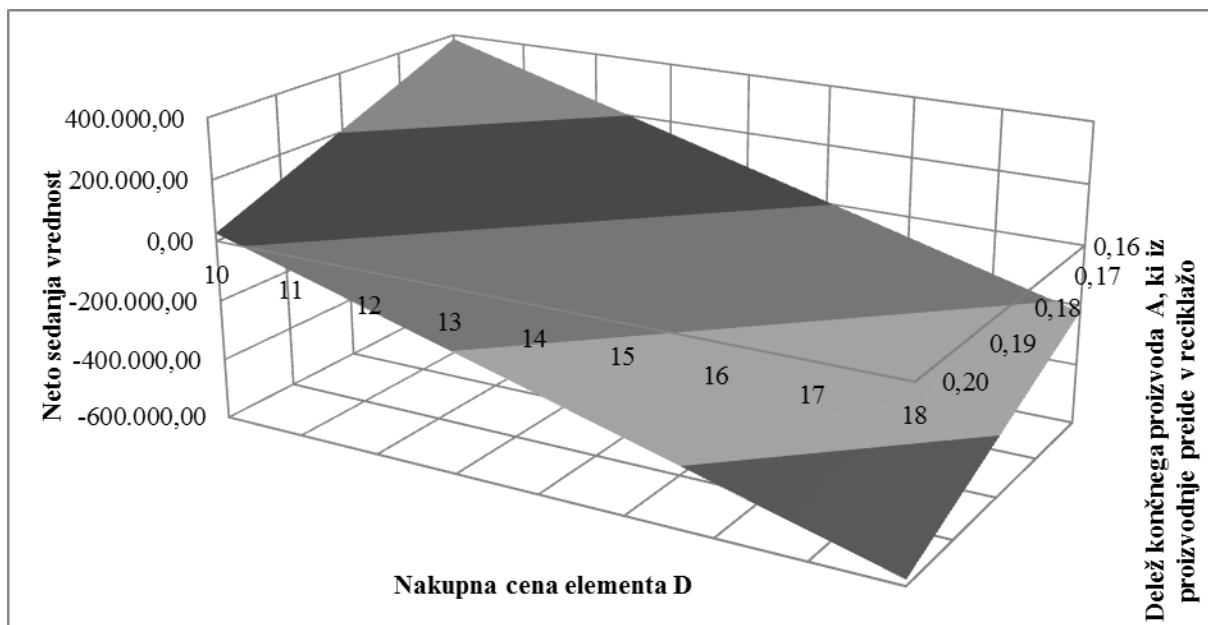
Zmanjšanje deleža neustreznih končnih proizvodov, ki ga izolirano od sprememb drugih parametrov simuliramo na Sliki 41, lahko dosežemo zgolj z ustreznimi spremembami znotraj proizvodnega procesa:

- 1) zvišanje kvalitete vhodnih elementov (surovin),
- 2) tehnološke ali organizacijske izboljšave proizvodnje,
- 3) premik proizvodne celice aktivnosti na lokacijo z ohlapnejšimi regulativami glede kvalitete končnih proizvodov.

Vse zgoraj navedene spremembe se odrazijo v finančni investiciji, njihov vpliv na izboljšavo oskrbovalne verige pa lahko vrednotimo s pomočjo razširjene teorije planiranja materialnih potreb. Znižanje odpadnih končnih proizvodov iz proizvodnje, ki ga prikazujemo na Sliki 41,

lahko dosežemo z dvigom kvalitete vhodne surovine D. Območje dovoljenih kombinacij nam prikazuje ploskev na Sliki 42. Odločitve, ki se odrazijo v dvigu neto sedanje vrednosti nad inicialno raven (26.368,94), so z vidika ekonomsko-okoljskega ravnotežja racionalne.

Slika 42: Območje vpliva kvalitete vhodnega elementa (surovine) D na delež neustreznih končnih proizvodov A



V tem podpoglavju s simulacijami prikazujemo zgolj nekaj osnovnih ekonomsko-okoljskih zakonitosti znotraj celostnih oskrbovalnih verig. Z njimi potrjujemo pravilnost modelov, predstavljenih v tej doktorski disertaciji, hkrati pa prikazujemo, da lahko služijo kot izredno uporabno orodje pri iskanju zakonitosti znotraj oskrbovalnih verig. Z njimi lahko tako proučujemo obnašanje sistemov na različnih nivojih in izdelujemo analize na mikro ravni, ki so v pomoč pri sprejemanju odločitev posamičnih akterjev oskrbovalnih verig (posamične celice aktivnosti oziroma njihovi sklopi). Po drugi strani lahko s predstavljenim modelom ocenjujemo ustreznost ukrepov regionalnih politik in opazujemo njihov vpliv na ekonomsko-okoljsko obnašanje posamičnih akterjev. Model lahko torej na podlagi ekonomskih, okoljskih, tehnoloških in družbenih parametrov na najnižjem opazovanem nivoju odgovori tudi na zahtevna vprašanja regionalnega in globalnega pomena. Predstavljeni simulacijski model je prav tako primerno orodje za poglobljene analize ekonomsko-okoljskih ravnotežij raznolikih oskrbovalnih verig.

3.4.2 Primer praktične aplikacije – proizvodnja otroške hrane

Teorija planiranja materialnih potreb kljub dolgoletnemu razvoju in uveljavljenosti v akademskih krogih še ni doživela množičnejše praktične aplikacije. Njeno zmožnost proučevanja zakonitosti celostne oskrbovalne verige podjetja prikazujemo v okviru

slovensko-španskega sodelovanja pri proučevanju oskrbovalne verige podjetja, ki proizvaja otroško hrano (Kovačić, Hontoria, Bogataj & Ros, 2012). Za prikaz možnosti praktične aplikacije teorije v tem podglavju predstavljamo nekaj uvodnih izsledkov raziskave.

Proučevano podjetje je locirano na jugovzhodu Španije in s svojimi prehrabnimi izdelki pokriva celoten nacionalni trg, manjši del proizvodnje (približno 20 %) pa izvaža tudi v druge članice EU. V sicer širokem naboru končnih izdelkov podjetja igra najpomembnejšo vlogo otroška hrana. Visoki standardi in stroga zakonodaja zahtevajo visok nivo kontrole v vseh fazah procesa, od nabave sestavin za potrebe proizvodnje do ustreznega ravnanja s končnimi proizvodi tekom distribucije.

Ostanke proizvodnje, surovine, ki jim je potek rok trajanja, in končne izdelke, ki ne dosegajo zahtevanih standardov, mora podjetje poslati v uničenje, svoj cikel pa zaključijo na deponiji. Posledice uničenja teh izdelkov so izgubljeni prihodki, ki bi jih podjetje prejelo z njihovo prodajo na trgu, in stroški, povezani z njihovim uničenjem (transport, uničenje in plačilo okoljskih dajatev). Kompleksnost proizvodnega procesa se odraža v opaznih časovnih zakasnitvah, do katerih prihaja vse od naročila surovin do distribucije končnih izdelkov na trg. Relativno dolge časovne zakasnitve, visoke cene surovin (sestavin) in široka distribucijska mreža predstavljajo dobro osnovo za proučevanje oskrbovalne verige s pomočjo razširjene teorije planiranja materialnih potreb.

V prvi fazi raziskave se omejujemo zgolj na en končni izdelek, in sicer kozarec otroške mesne hrane z neto težo 250 gramov. Njegova proizvodnja poteka trikrat mesečno v kontingentih po 152.000 kozarcev. Vzpostavitevni stroški proizvodnje vsakega kontingenta znašajo 20.000 €, proizvodnja posamičnega kontingenta pa traja en delovni dan. Preden lahko končni izdelki vstopijo na trg, morajo uspešno prestat 11-dnevno karanteno. Približno 1,1 % celotne proizvodnje predstavljajo ostanki oziroma izdelki, ki ne dosegajo zahtevane ravni kvalitete. Skupni strošek odstranitve, ki zajema transportne stroške, stroške uničenja, stroške deponiranja na odlagališču ter plačilo okoljskih dajatev, znaša 0,145 € na odpadni kozarec hrane. Veleprodajna cena končnega izdelka znaša 0,65 €. Povprečni strošek distribucije izdelkov do veletrgovcev, ki bremenijo proizvajalca, znaša 0,031 € na kozarec. Za vsak proizvedeni kozarec mora podjetje plačati tudi okoljsko dajatev v višini 0,0035 €. Če predpostavimo, da obveznost plačila stroškov distribucije in okoljskih dajatev nastane istočasno, kot zapade terjatev plačila za končne izdelke, lahko sistem poenostavimo tako, da ustrezno prilagodimo veleprodajno ceno: $0,65 \text{ €} - 0,031 \text{ €} - 0,0035 \text{ €} = 0,6155 \text{ €}$.

Podrobno strukturo končnega izdelka predstavljamo v Tabeli 11, v kateri nadomeščamo poimenovanje sestavin s črkovnim poimenovanjem. Tabela vsebuje tudi cene na enoto posamičnih sestavin ter časovne zakasnitve, ki jih delimo na:

- 1) dobavne časovne zakasnitve: čas od izvedbe naročila do dejanskega prejetja sestavin v skladišče,

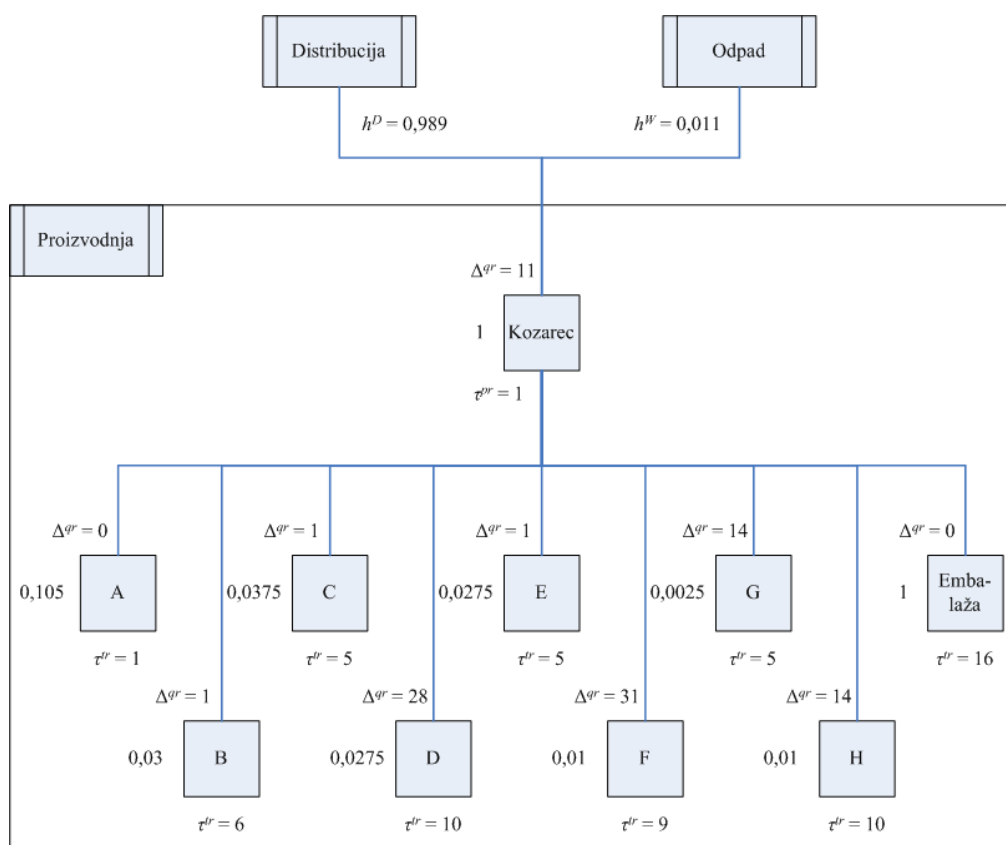
- 2) časovne zakasnitve zaradi karantene: čas, ki mora preteči za ugotovitev ustreznosti sestavin, ki vstopajo v proizvodnjo, v skladu z internimi standardi podjetja.

Opisani model lahko predstavimo v obliki razširjene kosovnice (Slika 43).

Tabela 11: Struktura končnega izdelka, cene surovin in časovne zakasnitve

Sestavina	Količina/kozarec	Cena/enoto	Dobavne časovne zakasnitve	Časovne zakasnitve zaradi karantene
A	0,1050 kg	0,0060 €	1 dan	0 dni
B	0,0300 kg	0,8434 €	6 dni	1 dan
C	0,0375 kg	0,5000 €	5 dni	1 dan
D	0,0275 kg	6,9277 €	10 dni	28 dni
E	0,0275 kg	0,6988 €	5 dni	1 dan
F	0,0100 kg	0,6024 €	9 dni	31 dni
G	0,0025 kg	1,8072 €	5 dni	14 dni
H	0,0100 kg	0,7229 €	10 dni	14 dni
Embalaža	1 kos	0,0843 €	16 dni	0 dni

Slika 43: Razširjena kosovnica za proizvodnjo in distribucijo enega kozarca otroške hrane (struktura izdelka z vključenimi časovnimi zakasnitvami)



Opisane strukture lahko zajamemo v vhodno matriko **H**, izhodno matriko **G** in vektor gostote tokov **P**:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0,105 \\ 0,03 \\ 0,0375 \\ 0,0275 \\ 0,0275 \\ 0,01 \\ 0,0025 \\ 0,01 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0,989 \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ 0,011 \end{bmatrix} \quad \mathbf{P} = \begin{bmatrix} 152.000 \\ 152.000 \end{bmatrix} \quad (186)$$

Ker smo opazovanje modela omejili na zgolj 2 podsistema (proizvodnjo in reciklažo oziroma odpad), sta dimenziji vhodne in izhodne matrike zmanjšani na podmatriki 2 x 2. Neto proizvodnja takšnega sistema **z** je zato:

$$\mathbf{z} = \mathbf{y} - \mathbf{x} = \mathbf{GP} - \mathbf{HP} = (\mathbf{G} - \mathbf{H})\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 150.328 \\ -15.960 \\ -4.560 \\ -5.700 \\ -4.180 \\ -4.180 \\ -1.520 \\ -380 \\ -1.520 \\ -152.000 \\ 1.672 \end{bmatrix} \quad (187)$$

Rezultat vsakega proizvodnega cikla je torej 150.328 kozarcev otroške hrane, ki je primerna za prodajo na trgu. Preostalih 1.672 kozarcev predstavlja odpadke, ki jih mora podjetje ustrezno uničiti in odložiti na deponijo. Znotraj vsakega proizvodnega cikla potrebujemo 15.960 kg sestavine A, 4.560 kg sestavine B, 5.700 kg sestavine C, 4.180 kg sestavine D, 4.180 kg sestavine E, 1.520 kg sestavine F, 380 kg sestavine E in 1.520 kg sestavine H. Za embaliranje končnih izdelkov znotraj proizvodnega cikla pa potrebujemo 152.000 kosov embalaže (kozarcev).

V skladu s Tabelo 11 lahko zapišemo cenovni vektor $\mathbf{p}$, ki zajema cene z vseh nivojev proučevanega proizvodnega sistema:

$$\mathbf{p} = [0,6155 \ 0,006 \ 0,8434 \ 0,5 \ 6,9277 \ 0,6988 \ 0,6024 \ 1,8072 \ 0,7229 \ 0,0843 \ -0,145] \quad (188)$$

Vzpostavitevni stroški se zaradi poenostavitve modela pojavljajo samo v proizvodnem podsistemu, zato jih zajamemo v vektorju $\hat{\mathbf{K}}$ na naslednji način:

$$\hat{\mathbf{K}} = [-20,000 \quad 0] \quad (189)$$

Ker so znani začetni (inicialni) časi in dolžine ciklov, lahko izračunamo dane čase:

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{v}}(\rho) &= \tilde{\mathbf{t}}(\rho)\tilde{\mathbf{T}}(\rho) = \begin{bmatrix} e^{-\rho t_1} & \\ & e^{-\rho t_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (1-e^{-\rho T_1})^{-1} & \\ & (1-e^{-\rho T_2})^{-1} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} e^{-41\rho} & \\ & e^{-52\rho} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (1-e^{-10\rho})^{-1} & \\ & (1-e^{-10\rho})^{-1} \end{bmatrix} = [1.213, 07 \quad 1.211, 98]\end{aligned}\tag{190}$$

Ko v model vključimo časovne zakasnitve, ki so posledica dobav, karantene in proizvodnje, lahko vhodno in izhodno matriko zapišemo v generalizirani obliki:

$$\tilde{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} 0,105e^{\rho(1+0+1)} \\ 0,03e^{\rho(6+1+1)} \\ 0,0375e^{\rho(5+1+1)} \\ 0,0275e^{\rho(10+28+1)} \\ 0,0275e^{\rho(5+1+1)} \\ 0,01e^{\rho(9+31+1)} \\ 0,0025e^{\rho(5+14+1)} \\ 0,01e^{\rho(10+14+1)} \\ 1e^{\rho(16+0+1)} \end{bmatrix} \quad \tilde{\mathbf{G}} = \begin{bmatrix} 0,989e^{-\rho^{*11}} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ 0,011e^{-\rho^{*11}} \end{bmatrix} \quad (191)$$

Podjetje si lahko izposoja denar po letni obrestni meri 3,50 % (zvezna obrestna mera $\rho = 0,035$). Informacije zadoščajo za izračun skupne neto sedanje vrednosti z neskončnim številom ponavljajočih se ciklov:

$$NSV_{kumulativa} = p(\tilde{G}(\rho) - \tilde{H}(\rho))\tilde{P}(\rho) - \hat{K}\tilde{v}(\rho) = 18.559.553,20 \text{ €} \quad (192)$$

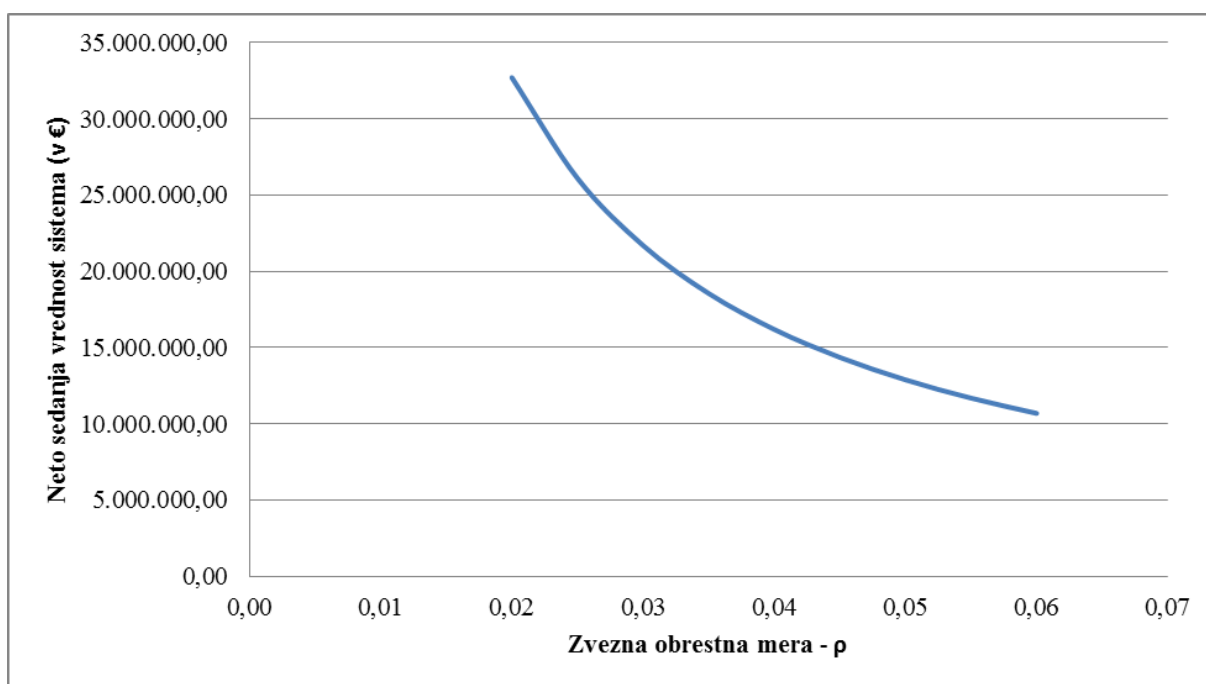
Če dolžino cikla T povečamo v neskončnost, lahko izračunamo neto sedanjo vrednost, ki je dober približek neto sedanje vrednosti prvega cikla:

$$NSV_{prvi_cikel} = p(\tilde{G}(\rho) - \tilde{H}(\rho))\tilde{P}(\rho) - \hat{K}\tilde{v}(\rho) = 17.788,30 \text{ €} \quad (193)$$

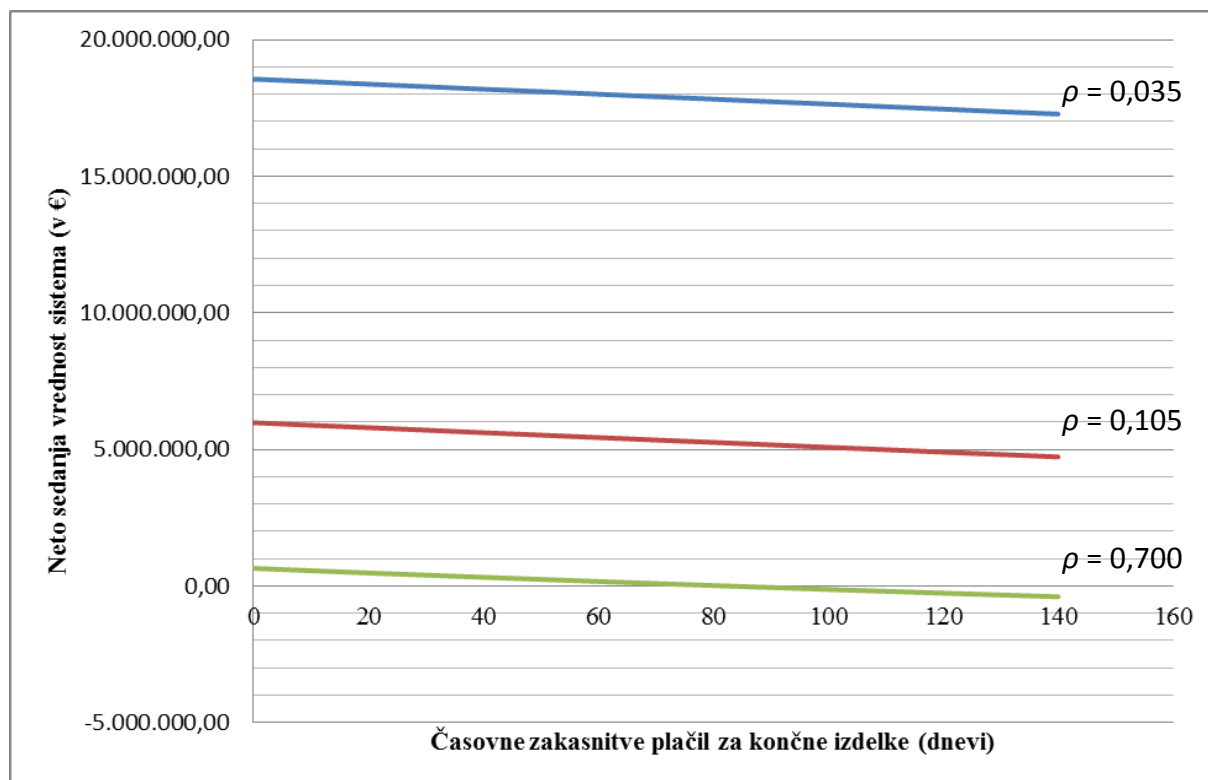
Proizvodnja končnega izdelka bo dolgoročno dobičkonosna, kadar ostanejo vsi parametri nespremenjeni tekom vseh ponavljajočih se ciklov. Občutljivost na spremembo posamičnih parametrov je smiselno opazovati z ustreznimi simulacijami, ki podjetju omogočijo pravočasno ukrepanje in prilagoditev procesov novonastalim razmeram. Nekaj primerov analiz navajamo v nadaljevanju.

Na Sliki 44 lahko tako opazujemo vpliv spremembe obrestne mere na skupno neto sedanjo vrednost sistema. Takšna analiza je podjetju v pomoč pri določitvi mejne obrestne mere, pri kateri si še lahko izposoja denar in hkrati ohrani dolgoročno dobičkonosnost svoje oskrbovalne verige. Zelo visoka obrestna mera lahko namreč v določenih primerih vpliva na sistem tako, da ta generira izgubo. Takšen primer prikazujemo na Sliki 45, iz katere je razvidno, da izredno visoka obrestna mera (70 %) v kombinaciji z naraščanjem časovnih zakasnitev plačil vodi v stanje, ko ob nespremenjenih drugih dejavnikih proizvodnja ni več smiselna.

Slika 44: Vpliv zvezne obrestne mere na celotno neto sedanjo vrednost sistema

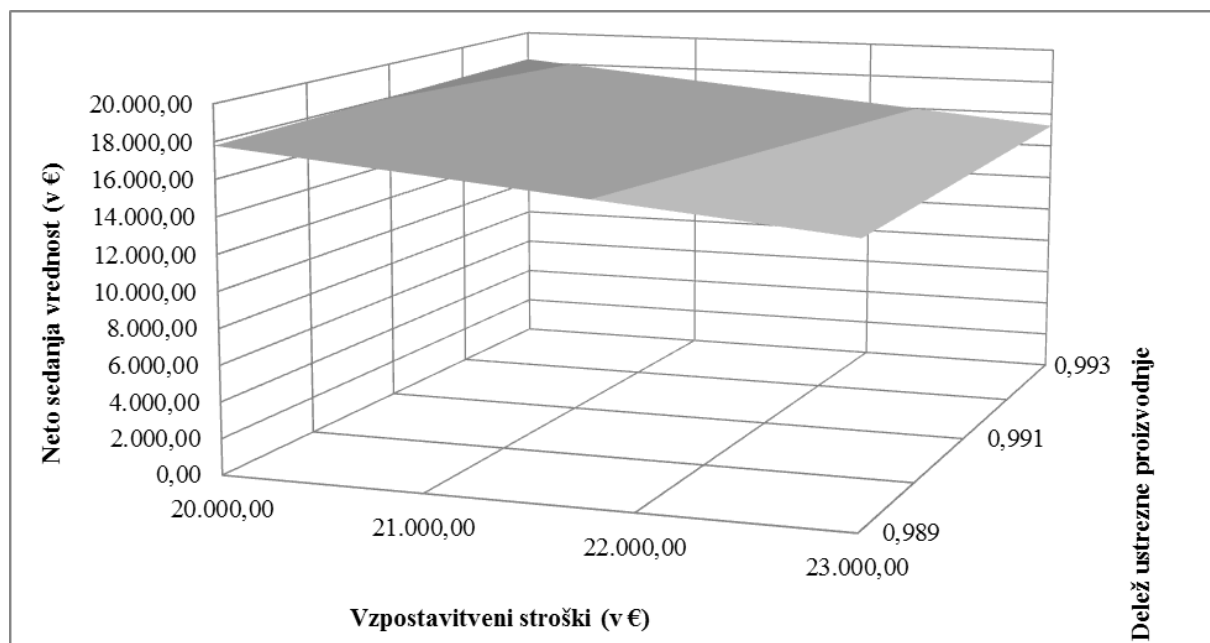


Slika 45: Vpliv časovnih zakasnitev plačila končnih izdelkov na neto sedanjo vrednost sistema pri različnih zveznih obrestnih merah



Podjetje med proizvodnjo posamičnega kontingenta generira relativno majhno količino odpadkov (1,1 %). Kljub temu obstaja možnost izboljšave z ustrezno modifikacijo proizvodne linije (Slika 46). Podrobnejši vpogled v proizvodni proces razkrije, da večina odpadkov nastane znotraj proizvodnih cevi. Z ustreznimi tehničnimi izboljšavami postopka lahko dosežemo znižanje te količine odpadkov, s čimer povečamo neto sedanjo vrednost prihodkov (dodatni prodani proizvodi) in znižamo stroške, povezane z uničenjem in deponiranjem teh odpadkov. Takšna tehnološka sprememba pa po drugi strani pomeni investicijo v proizvodni proces, ki se odrazi v zvišanju proizvodnih stroškov. V poenostavljeni analizi te stroške dodamo vzpostavitev stroškom. Simulacija na Sliki 46 torej prikazuje območje teoretično možnih neto sedanjih vrednosti prvega cikla glede na spremembo višine vzpostavitev stroškov in delež odpadkov. Vse kombinacije niso uresničljive, dejanska izvedljivost je namreč odvisna od tehnoloških omejitev in stroška izvedbe prilagoditev. Simulacija pa je podjetju lahko v pomoč pri vrednotenju ustreznih investicij v tehnološke izboljšave. Če lahko podjetje znotraj celotnega območja najde točko, v kateri je neto sedanja vrednost višja od obstoječe, je tehnološka sprememba proizvodnega procesa smiselna. Če takšna točka ne obstaja, je trenutno stanje optimalno ali pa ga lahko izboljšamo s spremembo katerega od drugih parametrov.

Slika 46: Območje gibanja neto sedanje vrednosti prvega proizvodnega cikla glede na vzpostavitevne stroške in delež ustrezne končne proizvodnje



Predstavljeni model ima nekaj pomanjkljivosti, ki omejujejo njegovo celotno praktično uporabnost. Za ustrezno obravnavo zalog moramo tako vključiti tudi ustrezno vrednotenje stroškov držanja zalog v skladiščih in stroškov karantene. Vpogled v oskrbovalno verigo je treba razširiti tudi s podrobnejšo analizo distribucijskih aktivnosti. Celotni model bo s temi parametri razširjen v nadaljnjih raziskavah, dosednji rezultati pa dokazujejo vsestransko uporabnost razširjene teorije planiranja materialnih potreb tudi pri praktičnih aplikacijah.

4 PREDSTAVITEV IN ANALIZA REZULTATOV

4.1 INTERPRETACIJA REZULTATOV

Z rezultati doktorske disertacije v celoti potrjujemo temeljno hipotezo in vse izvedene hipoteze, ki jih navajamo v uvodnem poglavju.

V raziskovalnem delu dokazujemo, da je znotraj razširjene teorije materialnih potreb mogoče zapisati generalizirano vhodno in izhodno matriko v posplošeni obliki. Tak splošni zapis je pomemben za nadaljnje raziskovanje tega področja, saj postavlja podrobno temeljno strukturo modela. Dokazujemo tudi, da je model primeren za obravnavo vseh fizično mogočih materialnih tokov, in sicer z dvema pristopoma, ki se razlikujeta v količini vsebovanih podrobnih informacij. Prvi pristop je primernejši za makroekonomsko opazovanje vplivov posamičnih parametrov na ekonomsko-okoljsko ravnotežje, kot so na primer energetski tokovi, okoljske dajatve in prostorske alokacije posamičnih celic aktivnosti glede na privlačnost posamičnega regionalnega ali lokalnega okolja. Drugi pristop je bistveno kompleksnejši, ponuja pa nam dodatno možnost opazovanja posamičnega elementa na najnižjem nivoju kroženja skozi več ciklov proizvodnje, distribucije, potrošnje in reciklaže, vse dokler ne zaključi svojega krogotoka na deponiji kot odpadke, za katerega plačujemo okoljske dajatve. Z numeričnimi primeri in na njih temelječimi simulacijami dokazujemo pomemben vpliv ekoloških dajatev in okoljskih vzpodbud na ravnotežje sistema. Z razširjeno teorijo planiranja materialnih potreb torej lahko preko neto sedanje vrednosti celotnega sistema spremljamo vplive različnih odločitev, povezanih z okoljsko problematiko. Te odločitve vplivajo na optimalne stopnje reciklaže vsakega posamičnega materialnega toka, ki pa so poleg tega odvisne tudi od kvalitete vstopnih elementov (izrabljenih ali neuporabljenih izdelkov in ostankov proizvodnje). S stopnjami reciklaže determiniramo stopnjo ponovne uporabe osnovnih naravnih virov, kar je ključnega pomena za vzpostavitev dolgoročne vzdržnosti ekonomskega in okoljskega sistema, v katerem živimo.

V razširjeni sistem teorije planiranja materialnih potreb kot dodaten vhod uvedemo energijo, ki predstavlja pomemben raziskovalni izziv zaradi omejene razpoložljivosti v uporabni obliki, naraščajočih cen in novodobnih tehnološko čistejših možnosti njenega pridobivanja. Energija je gonilo vseh procesov oskrbovalne verige in ima občutne neposredne in posredne vplive na okolje, zato je njena vključitev v razširjeno teorijo planiranja materialnih potreb pomembna za celostno obravnavo tudi v nadaljnjih raziskavah s tega področja. V raziskovalnem delu dokažemo, da je input-output model razširjene teorije planiranja materialnih potreb primeren za opazovanje tako vhodnih kot tudi izhodnih energijskih tokov. Z izhodnimi energijskimi tokovi lahko uspešno raziskujemo povratno pridobivanje (recikliranje) energije znotraj procesov razstavljanja na sestavne dele in znotraj deponiranja odpadkov na odlagališča, kar vključuje tudi sežig odpadkov.

V raziskovalnem delu doktorske disertacije se osredotočamo na reciklažne aktivnosti znotraj celostne oskrbovalne verige, kljub temu pa upoštevamo tudi okoljske vplive drugih podsistemov. Znotraj predstavljenega modela lahko tako obravnavamo izgube proizvodnje in drugih podsistemov. Gre za elemente, ki svojega cikla nikdar ne zaključijo v reciklaži, zato jih obravnavamo kot neposredno onesnaževanje okolja. Model omogoča tudi obravnavo navideznih tokov, pri čemer so informacijski, materialni in finančni tok medsebojno neodvisni. Z numeričnimi primeri na vseh nivojih preverimo pravilnost postavljenih modelov in olajšamo njihovo razumevanje, poleg tega pa pokažemo, da je mogoča tudi praktična aplikacija teorije na konkretne primere, s katerimi se srečujemo v realnem svetu. Obnašanje postavljenega modela ob spremembi posamičnega parametra, povezanega z okoljsko problematiko, v zaključnem delu raziskovalnega dela naloge preverimo s simulacijami in opazujemo vpliv spreminjanja posamičnih vhodnih parametrov na neto sedanjo vrednost sistema.

Na podlagi dobljenih rezultatov lahko torej v celoti potrdimo temeljno hipotezo:

Sodobna teorija planiranja materialnih potreb, ki jo je zgradil Grubbström in jo razširil skupaj z L. Bogatajem in M. Bogataj, je primerna podlaga za obravnavo ekonomsko-okoljskega ravnotežja v oskrbovalni verigi.

Z raziskovalnim delom v celoti potrjujemo tudi ostale 4 postavljene hipoteze:

- 1) *Obstoječa vključitev reciklažnega podsistema v teorijo planiranja materialnih potreb omogoča proučevanje tokov, povezanih z reciklažo, in jo je mogoče uporabiti tudi v širšem pomenu obravnave ekonomsko-okoljskega ravnotežja.*

Razširjeni modeli, predstavljeni v podpoglavjih 3.1, 3.2 in 3.3, v celoti potrjujejo hipotezo. Proučevanje vseh tokov je mogoče, pri čemer glede na raziskovalne potrebe izberemo model, ki ohranja želeno globino informacij o posamičnih elementih sistema skozi več ciklov kroženja. Teorijo planiranja materialnih potreb lahko uporabimo tudi v širšem pomenu, kar dokazujemo z vključitvijo energijske komponente kot pomembnega okoljskega dejavnika v model in podrobneje analiziramo v podpoglavju 3.1.7. Teorija omogoča prostorsko analizo privlačnosti posamičnih lokacij, ki temelji na ekonomskih, tehnoloških in pravnih značilnostih določenega okolja. V raziskovalnem delu igra prostorska komponenta pomembno vlogo predvsem z vidika okoljske usmerjenosti in iskanja ustreznega ekonomsko-okoljskega ravnotežja.

- 2) *Poleg toka iz proizvodnje na trg je treba za ugotavljanje ekonomsko-okoljskega ravnotežja proučevati tudi tok iz proizvodnega in distribucijskega procesa v reciklažni podsistem.*

Proučevanje vseh tokov je smiselno, kar potrjujejo tudi številna znanstvena dela s področja okoljske problematike. Nekaj izbranih del s tega področja navajamo v pregledu literature v podpoglavju 1.2. Dokazujemo, da vpliv industrije in transporta na

okolje celo presega vpliv dejanske končne potrošnje, zato je razširitev predpostavk modela teorije planiranja materialnih potreb s tega stališča smiselna in potrebna. Modeli, ki jih raziskujemo v doktorski disertaciji, pokrivajo vse fizično mogoče tokove, kar zapišemo v splošni obliki vhodno-izhodnih matrik. Predstavimo dva mogoča načina vključitve vseh tokov, ki se razlikujeta v svoji kompleksnosti in podrobnosti interpretacije, ki jo omogočata. Pri vsakem pristopu dopuščamo izstop elementov na vsakem nivoju montažnega sistema. Gre za odpadke, ki so rezultat montažnih aktivnosti, presežno proizvodnjo, izdelke nezadostne kvalitete, poškodovane izdelke ipd. Končni proizvodi, ki zapustijo proizvodno linijo, pa ne vstopijo vedno v proces potrošnje. Lahko se izločijo med distribucijskimi aktivnostmi zaradi uničenja ali poškodb pri prevozu, poteka roka uporabnosti, zastarelosti zalog ipd. Ti tokovi pa so sestavni del procesov, ki jih obravnavamo znotraj razširjene teorije planiranja materialnih potreb skozi celotno doktorsko disertacijo.

- 3) *Znotraj proizvodnega podsistema je treba za ugotavljanje ekonomsko-okoljskega ravnotežja obravnavati neposredni tok v reciklažni podsystem tudi na nivoju elementov s katerekoli stopnje montažnega ali distribucijskega podsistema. Ravnotežje je mogoče ugotavljati preko proizvodnih funkcij Cobb-Douglasovega tipa.*

Za proučevanje reciklažnih aktivnosti v raziskovalnem delu uporabimo klasično Cobb-Douglasovo proizvodno funkcijo v razširjeni obliki, ki poleg kapitala in dela vključuje tudi energijo. Povečevanje števila odpadnih elementov, ki vstopijo v reciklažni podsystem, večji vložki delovne sile ali povečanje količine vhodne energije praviloma povečajo razmerje recikliranih elementov proti odpadnim elementom, ki zaključijo svoj cikel na deponijah. To razmerje je odvisno tudi od tehnološke razvitosti in produktivnosti posamičnega okolja, kar prav tako zajemamo v proizvodnih funkcijah modela. V sodobnih teorijah proizvodnje avtorji nadomeščajo klasične proizvodne funkcije Cobb-Douglasovega tipa z novejšimi pristopi, ki jih lahko po analogiji vključimo tudi v model razširjene teorije planiranja materialnih potreb.

- 4) *V okviru razširjenega modela je mogoče obravnavati izgube sistema. Izgube sistema so tisti elementi, ki nikdar ne zaključijo cikla, torej nikdar ne vstopijo v proces reciklaže, ampak se izgubijo v kateremkoli od predhodnih procesov, praviloma na deponiji.*

Mogočih je več različnih pristopov vključitve izgub sistema v model. V raziskovalnem delu obravnavamo izgube sistema kot elemente, ki predstavljajo neposredni odpad, ki ima vsestranske negativne ekološke vplive. Odpadni elementi povzročijo ekološki strošek, zato zanje zahtevamo plačilo okoljskih dajatev. Dajatve interpretiramo kot dejansko okoljsko škodo, ki jo finančno ovrednotimo; odpadni elementi torej znižujejo neto sedanjo vrednost celotnega sistema. Brez upoštevanja okoljskih dejavnikov so lahko ekonomsko učinkovite tudi oskrbovalne verige, v katerih proizvajamo izdelke, pri katerih končni potrošniki niso motivirani za skrbno ravnanje z njimi ob koncu

njihovega življenjskega cikla. Če pa vanje vključimo okoljske vplive, ki jih vrednotimo z negativnim cenovnim vektorjem, lahko z vidika ekonomsko-okoljskega ravnovesja postanejo neučinkovite. Takšna oskrbovalna veriga je nesprejemljiva z vidika dolgoročne vzdržnosti in vzpostavitve dolgoročnega ekonomsko-okoljskega ravnotežja. Razširjena teorija planiranja materialnih potreb tako služi kot orodje za proučevanje teh korelacij in sprejemanje odločitev, ki lahko skrbijo za vzpodbujanje okoljsko sprejemljivega obnašanja vseh udeležencev oskrbovalnih verig.

4.2 PRISPEVEK IN OMEJITVE DOKTORSKE DISERTACIJE

Bistveni raziskovalni prispevek doktorske disertacije je zasnova razširjenega modela celostne oskrbovalne verige, ki je formuliran v splošni obliki in posledično uporaben za poglobljene analize raznolikih ekonomsko-okoljskih problemov na mikro in makro nivoju. Model daje odgovore na okoljska vprašanja, ki so pomembna za celotno družbo in za vzpostavitev dolgoročnega ekonomsko-okoljskega ravnotežja. Uporaben je za sprejemanje pomembnih okoljskih odločitev na globalnem, regionalnem ali lokalnem nivoju, kar vključuje tudi določanje primernih okoljskih dajatev in subvencij za pridobivanje energije iz obnovljivih virov. Spopada se s kompleksnim vprašanjem izbire optimalnih lokacij posamičnih celic aktivnosti v globalnih oskrbovalnih verigah, odločitve pa temeljijo na specifičnih parametrih posamičnih mikrolokacij. Teorija omogoča neposredno primerjavo konkurenčnih lokacij, ki se razlikujejo v stopnji tehnološke razvitosti, ceni in produktivnosti delovne sile, razvitosti transportnih povezav in oddaljenosti od drugih celic aktivnosti znotraj mreže, energetske učinkovitosti in z njo povezanih stroškov ter lokalni okoljski zakonodaji. V raziskovalnem delu torej združujemo tako ekonomsko učinkovitost kot okoljsko komponento, kar je bistveno pri sodobnem proučevanju dolgoročne vzdržnosti sistemov in iskanju ravnotežja, ki bo omogočalo kvaliteto bivanja tudi prihodnjim generacijam.

Doktorska disertacija je eno redkih del, ki se ukvarja z razširjeno teorijo materialnih potreb. Z raziskovalnim delom dokazujemo sposobnost pokritja širšega nabora okoljskih vprašanj, ki pa jih v tej disertaciji ne obravnavamo v celoti. Nekaj idej o možnih razširitvah navajamo v naslednjem podpoglavju, vsekakor pa puščamo odprte široke možnosti nadaljnjih raziskovalnih aktivnosti s tega področja. Takšna univerzalnost in širina sta dobrodošli, saj omogočata, da v model vključujemo širok spekter dejavnikov realnega sveta, ki vplivajo na obnašanje konkretnega sistema. Žal pa z dodajanjem parametrov izrazito narašča kompleksnost modela, kar je ena izmed glavnih omejitev pri proučevanju celovitih oskrbovalnih verig realnega sveta nasploh. Relativno visoka kompleksnost modela omejuje njegovo raziskovanje na omejeno območje posamičnih celic aktivnosti, s čimer lahko izgubimo vpogled v obnašanje in vrednotenje sistema kot celote. To omejitev pa do neke mere rešujemo s simulacijskimi modeli.

V vseh sklopih raziskav te doktorske disertacije predpostavljamo determinističnost procesov, s čimer model poenostavljamo. Procesi v realnosti niso deterministični, ampak stohastični,

zato model ne odraža v celoti stanja realnega sveta, ampak zgolj njegov približek. Ta približek je sicer sprejemljiv z vidika makroekonomske analize, vendar njegove omejitve postanejo očitnejše pri uporabi odločitvenega modela na mikro nivoju. Za tovrstne raziskave je smiselno model obravnavati kot stohastični model, kar pa zopet poveča njegovo kompleksnost; to je razvidno tudi iz del Tanga in Grubbströma, ki jih opisujemo v pregledu literature v podpoglavju 2.1.

4.3 MOŽNOSTI ZA NADALJNJE RAZISKOVANJE

Z modeli, predstavljenimi v tej doktorski disertaciji, odpiramo veliko novih vprašanj, zaradi njihove zasnove pa dopuščamo tudi širok spekter nadaljnjih raziskav z vidika okoljske problematike. V nadaljevanju naštevamo zgolj nekaj najbolj očitnih možnih razširitev oziroma nadgraditev predstavljenih modelov. Ta nabor pa ne omejuje možnosti proučevanja, saj univerzalnost in širina modela dopuščata izredno poglobljene analize z različnih zornih kotov raziskovanja. Zasnova modela omogoča vključitev proučevanja najrazličnejših podrobnosti, kar pa posledično vodi v povečanje njegove kompleksnosti in zmanjšuje njegovo obvladljivost.

Model lahko smiselno nadgradimo z dejanskim onesnaževanjem, ki ga povzročajo posamične celice aktivnosti. Onesnaževanje lahko vključuje izpuste toplogrednih plinov, odpadne vode, izpuste v ozračje, hrup ipd., v model pa ga vključimo z izhodnimi matrikami, preko katerih finančno ovrednotimo škodljive vplive oskrbovalne verige na okolje. Pričakujemo lahko negativno neto sedanjo vrednost onesnaženja, ki znižuje ekonomičnost celotnega sistema za finančno ovrednoten faktor vpliva onesnaževanja na okolje. Raziskave na tem področju izvajamo v trenutku priprave te doktorske disertacije.

Način obravnave energije, kakršnega predstavljamo v tej doktorski disertaciji, lahko nadalje smiselno razčlenimo tako, da že pri vhodni matriki ločujemo izvor energije. V doktorski disertaciji namreč porabo energije proučujemo v stroškovno-prihodkovnem smislu, pri čemer je njen dejanski izvor zapostavljen. Energija, ki jo pridobivamo iz čistejših ali obnovljivih virov, predstavlja manjšo posredno obremenitev okolja kot energija, ki jo pridobivamo na tradicionalne načine. Celostna obremenitev okolja zaradi aktivnosti znotraj vsake posamične celice aktivnosti sistema je tako manjša v primeru uporabe čistejših virov energije, vendar je lahko tak sistem v stroškovnem smislu tudi manj konkurenčen. Razširjena teorija planiranja materialnih potreb omogoča vključitev in opazovanje tako razširjenih energijskih tokov.

Proizvodne funkcije Cobb-Douglasovega tipa so sicer z vidika modeliranja relativno enostavne, vendar se na raziskovalnem področju in tudi pri praktičnih aplikacijah vedno bolj uveljavljajo sodobnejši pristopi, s katerimi bolje opisujemo vplive različnih dejavnikov na proizvodnjo. V raziskovalnem delu tako upoštevamo tudi energijo, ki postaja bistvena sestavina večine sodobnih proizvodnih funkcij, kar dokazuje širok nabor raziskovalnih del. V primeru praktične aplikacije razširjene teorije planiranja materialnih potreb je smiselno

razmisлити o zamenjavi Cobb-Douglasove proizvodne funkcije s sodobnejšim pristopom. Nekaj proizvodnih funkcij, ki poglobljeno obravnavajo tudi energijski vidik, navajamo v vsebinskem delu doktorske disertacije in lahko služijo kot navdih za podrobnejše raziskovanje v prihodnosti.

V obravnavanem modelu v veliki meri poenostavljamo obnašanje podsistema potrošnje. V raziskovalnem delu se namreč omejujemo na vhod končnega proizvoda in njegov kasnejši izhod v izrabljeni obliki ob koncu življenjske dobe. Pri tem izgubimo informacijo o načinu uporabe tega izdelka ter njegovem vplivu na okolje med celotno življenjsko dobo (potrošnjo). Ena od pomembnih lastnosti današnjih končnih proizvodov je prav njihova energetska učinkovitost, ki je v veliko primerih tudi jasno označena na embalaži. Energijsko učinkovitejši izdelki manj obremenjujejo okolje kot zastareli in posledično manj učinkoviti izdelki, kar predstavlja še enega od dejavnikov, ki ga je smiselno upoštevati pri vrednotenju neto sedanje vrednosti celotne oskrbovalne verige. Pri energijsko učinkovitejših proizvodih lahko namreč pričakujemo višjo neto sedanjo vrednost kot pri energijsko manj učinkovitih proizvodih. Na tak način pa lahko ovrednotimo tudi smiselnost investiranja v raziskave in razvoj energijsko varčnih izdelkov.

Model, ki ga predstavljamo v doktorski disertaciji, je determinističen. Prehod iz determinističnosti procesov v stohastičnost procesov pomeni še eno od smiselnih nadaljnjih širitev in raziskav na področju vključitve okoljske komponente v razširjeno teorijo planiranja materialnih potreb. Stohastični procesi so znotraj teorije planiranja materialnih potreb podrobno raziskani, kar lahko razberemo iz številnih znanstvenih prispevkov; pomembnejše naštevamo v podpoglavju 2.1 te doktorske disertacije. Rezultate predhodnih raziskav lahko smiselno vključimo tudi z razširjeno teorijo planiranja materialnih potreb. Upoštevanje stohastičnosti procesov je smiselno predvsem pri aplikaciji modela na praktične primere proučevanja na mikroekonomskem nivoju, ki je še posebej občutljiv na manjša nihanja.

Da teorija planiranja materialnih potreb ni omejena zgolj na teoretično raven, ampak lahko služi tudi za proučevanje problemov realnega sveta, prikaže že Grubbström v svojih zgodnejših delih. V tej doktorski disertaciji model razširjene teorije planiranja materialnih potreb testiramo z uporabo numeričnih primerov in simulacij. Rezultati so vzpodbudni in kažejo, da je model primeren za praktično aplikacijo, kar predstavlja velik dodaten izziv za širšo raziskovalno javnost.

SKLEP

Grubbströмова teorija planiranja materialnih potreb se tekom svojega razvoja od zgodnjih začetkov v 60. do zrelih let v 90. letih izkaže kot pomemben prispevek na področju znanosti. Od prvotne usmerjenosti v reševanje proizvodno-skladiščne problematike se njen razvoj predvsem v tem tisočletju preusmeri tudi k širšim možnostim aplikacije, kot so transportni in okoljski problemi. Razširitve teorije pa širijo tudi njene zmožnosti proučevanja na širok spekter makroekonomskih vprašanj, pri čemer ohranjajo svoje mikroekonomske temelje. Tovrsten preplet nam omogoča opazovanje tako posamične celice aktivnosti, kar spada pod okrilje odločitev vodstva podjetij, kot tudi vpliva njihovih odločitev na lokalni, regionalni ali celo globalni ekonomsko-okoljski sistem, za katerega prevzemajo odgovornost različni nivoji oblasti.

Predvsem od druge polovice 20. stoletja je izredno aktualna problematika vzpostavitve vzdržnega ekonomsko-okoljskega ravnotežja. Njen naraščajoči pomen izpostavlja vedno večje število znanstvenih prispevkov, ki se lotevajo raziskovanja z različnih zornih kotov in z različnimi metodologijami. Pomen okoljske problematike je namreč večplasten:

- 1) izraba neobnovljivih naravnih virov, ki so v naravi omejeni,
- 2) izraba obnovljivih naravnih virov, ki so obnovljivi le do določene stopnje,
- 3) onesnaževanje okolja, ki je v največji meri posledica neposrednih industrijskih aktivnosti,
- 4) kopičenje velikih količin odpadkov, ki končajo na deponijah, nezanemarljiv del pa tudi nekontrolirano v naravnem okolju,
- 5) problem omejenih energijskih virov ter nenehno naraščajočih potreb po njih,
- 6) globalne okoljske spremembe, ki bodo v prihodnosti radikalno vplivale na način življenja ljudi in njihove navade ter so rezultat preteklih in današnjih odločitev v zvezi s problematiko, ki jo opisujemo v predhodnih točkah.

V doktorski disertaciji potrjujemo hipotezo, da lahko ekonomsko-okoljsko ravnotežje v najširšem smislu obravnavamo s pomočjo teorije planiranja materialnih potreb. Teorija je v svoji razširjeni obliki sposobna proučevati interakcijo med ekonomskimi in okoljskimi interesi za vse zgoraj naštetе vrste vplivov na okolje. Združitev mikro in makro vidika pa se odraža v relativno visoki kompleksnosti modela. Ta kompleksnost pride še posebej do izraza z naraščanjem števila celic aktivnosti, ki jih vključimo v proučevanje znotraj oskrbovalne verige, in v primeru sledenja elementov skozi več ponavljajočih se ciklov. Opazovanje tako kompleksnega sistema olajšamo s simulacijskim modelom, ki se izkaže za uporabno orodje in pušča široke možnosti za prihodnje raziskave tega področja. Področje okoljske problematike vsekakor odpira veliko novih vprašanj in ponuja širok spekter možnosti proučevanja.

Velik del ugotovitev, ki temeljijo na modelih, predstavljenih v tej doktorski disertaciji, lahko zasledimo tudi na mednarodnih konferencah, na katerih jih pozitivno sprejema mednarodna

znanstvena publika. Razširjena teorija planiranja materialnih potreb predstavlja enega izmed redkih pristopov hkratnega proučevanja ekonomsko-okoljske problematike na mikro in makro nivoju, ki je sposoben iskati odgovore na širši spekter pomembnih ekološko-energijskih vprašanj. Torej lahko utemeljeno pričakujemo nadaljnji razvoj teorije v prihodnosti in njeno nadaljnje uveljavljanje v mednarodno priznanih znanstvenih publikacijah.

LITERATURA IN VIRI

- 1) Albino, V., Dietzenbacher, E., & Kültz, S. (2003). Analysing Materials and Energy Flows in an Industrial District using an Enterprise Input-Output Model. *Economic Systems Research*, 15(4), 457-480.
- 2) Artenjak, J. (1989). Planiranje materialnih potreb v poslovnih sistemih na podlagi input-output modelov. *Slovenska ekonomska revija*, 40(2), 169-178.
- 3) Axsäter, S. (1976). Balance of integrated production-inventory systems. *Proceedings, Second European Congress on Operation Research* (str. 9-19). Amsterdam: North-Holland.
- 4) Bachelet, B., & Yon, L. (2007). Model enhancement: Improving theoretical optimization with simulation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 15(6), 703-715.
- 5) Bernard, S. (2011). Remanufacturing. *Journal of Environmental Economics and Management*, 62(3), 337-351.
- 6) Berndt, E.R., & Wood, D.O. (1979). Engineering and Econometric Interpretations of Energy-Capital Complementarity. *American Economic Review*, 69(3), 342-354.
- 7) Bogataj, D., Vodopivec, R., & Bogataj, M. (2012). Dynamic decision model for superannuation of industrial workers. V R.W. Grubbström & H.H. Hinterhuber (ur.), *Seventeenth international working seminar on production economics, Innsbruck, 20-24 Feb. 2012, Pre-prints, Vol. 1* (str. 25-31). Innsbruck: Congress Innsbruck.
- 8) Bogataj, L., & Bogataj, M. (2008). Razširitev MRP teorije na distribucijo in logistiko ostankov. R. Vodopivec (ur.), *Matematična ekonomika, operacijske raziskave in logistika, serijska št. 7*. Ljubljana: Ekonomska fakulteta, KMOR.
- 9) Bogataj, L., Grubbström, R.W., & Bogataj, M. (1998). Input-output analysis and Laplace transforms in material requirements planning. V L. Bogataj, R.W. Grubbström & M. Bogataj (ur.), *Symposium, Storlien, 1997*. Portorož: Faculty of Maritime Studies and Transport.
- 10) Bogataj, L., & Horvat, L. (1996). Stochastic considerations of Grubbström-Molinder model of MRP, input-output and multi-echelon inventory systems. *International Journal of Production Economics*, 45(1-3), 329-336.
- 11) Bogataj, L., Kisperska, M.D., Bogataj, M., & Kovačič, D. (2009a). *Comparative analysis of functional determinants of virtual supply chains : project final report*. Katowice: Karol Adamiecki University of Economics.
- 12) Bogataj, L., Kisperska, M.D., Bogataj, M., & Kovačič, D. (2009b). The evaluation of virtual activities in global supply chains. V L.B. Ros McDonnell & R. Vodopivec (ur.), *Mathematical economics, Operational research and Logistics, Serial No. 8*. Ljubljana: University of Ljubljana, Faculty of Economics, KMOR.
- 13) Bogataj, M. (1996). Inventories in spatial models. *International Journal of Production Economics*, 45(1-3), 337-342.
- 14) Bogataj, M., & Bogataj, L. (2001). Supply chain coordination in spatial games. *International Journal of Production Economics*, 71(1), 277-285.

- 15) Bogataj, M., & Bogataj, L. (2004). On the compact presentation of the lead times perturbations in distribution networks. *International Journal of Production Economics*, 88(2), 145–155.
- 16) Bogataj, M., & Drobne, S. (1990). Vloga geodezije pri reševanju ekoloških problemov. *Geodetski vestnik*, 34(1), 41-49.
- 17) Bogataj, M., & Drobne, S. (1993). Vidiki internalizacije eksternih stroškov in politike varstva okolja v input-output modelih. V V. Rupnik & L. Bogataj (ur.), *Zbornik del SOR '93* (str. 179-192). Ljubljana: Slovensko društvo Informatika.
- 18) Bogataj, M., Drobne, S., & Bogataj, L. (1994). Market-oriented real estate policy as a challenge to sustainable development. V Z. Hajdú & G. Horváth (ur.), *European challenges and Hungarian responses in regional policy* (str. 436-484). Pécs: Centre for Regional Studies, Hungarian Academy of Sciences.
- 19) Bogataj, M., & Grubbström, R.W. (2011a). On the Representation of Timing for Different Structures within MRP Theory. *International Journal of Production Economic*, DOI: 10.1016/j.ijpe.2011.04.016.
- 20) Bogataj, M., & Grubbström, R.W. (2011b). Reverse logistics in extended MRP theory and impact on region. V *Supply chain and corporate environmental management: festschrift for prof. dr. dr. h. c. Knut Richter. Innovative betriebswirtschaftliche forschung und praxis, band 296* (str. 1-15). Hamburg: Kovač.
- 21) Bogataj, M., & Grubbström, R.W. (2011c). Transportation delays in reverse logistics. *International Journal of Production Economics*, DOI: 10.1016/j.ijpe.2011.12.007.
- 22) Bogataj, M., Grubbström, R.W., & Bogataj, L. (2011). Efficient location of industrial activity cells in a global supply chain. *International Journal of Production Economics*, 133(1), 243-250.
- 23) Chang, Y., Ries, R.J., & Wang, Y. (2011). The quantification of the embodied impacts of construction projects on energy, environment, and society based on I-O LCA. *Energy Policy*, 39(10), 6321-6330.
- 24) Chen, E.J., Lee, Y.M., & Selikson, P.L. (2002). A simulation study of logistics activities in a chemical plant. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 10(3-4), 235-245.
- 25) Ciaschini, M. (1988). *Input-output analysis: current developments*. London, New York: Chapman and Hall.
- 26) Cobb, C.W., & Douglas, P.H. (1928). A theory of production. *The American Economic Review*, 18(1), 139-165.
- 27) Commission of the European Communities (2000, 9. februar). *White paper on environmental liability*. Brussels: Commission of the European Communities, 2000.
- 28) Commission of the European Communities (2000, 26. julij). *Green Paper on Environmental issues of PVC*. Brussels: Commission of the European Communities, 2000.
- 29) Commission of the European Communities (2005, 21. december). *Taking sustainable use of resources forward: A Thematic Strategy on the prevention and recycling of waste*. Brussels: Commission of the European Communities, 2005.

- 30) Council of the European Communities (1975, 16. junij). Directive 75/439/EEC on the disposal of waste oils. *Official Journal of the European Communities*, L 194 (str. 23-25). Luxembourg: Council of the European Communities, 1975.
- 31) Council of the European Communities (1986, 12. junij). Directive 86/278/EEC on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture. *Official Journal of the European Communities*, L 181 (str. 6-12). Luxembourg: Council of the European Communities, 1986.
- 32) Council of the European Communities (1991, 21. maj). Directive 91/271/EEC concerning urban waste water treatment. *Official Journal of the European Communities*, L 135 (str. 40-52). Brussels: Council of the European Communities, 1991.
- 33) Council of the European Union (1999, 26. april). Directive 1999/31/EC on the landfill of waste. *Official Journal of the European Union*, L 182 (str. 1-19). Luxembourg: The Council of the European Union, 1999.
- 34) De Smet, R., & Gelders, L. (1998). Using simulation to evaluate the introduction of a Kanban subsystem within an MRP-controlled manufacturing environment. *International Journal of Production Economics*, 56-57(1), 111-122.
- 35) Di Vita, G. (2001). Technological change, growth and waste recycling. *Energy Economics*, 23(5), 549-567.
- 36) Dobos, I. (1998). Production-inventory control under environmental constraints. *International Journal of Production Economics*, 56-57(1), 123-131.
- 37) Dobos, I. (1999). Production strategies under environmental constraints in an Arrow-Karlin model. *International Journal of Production Economics*, 59(1-3), 337-340.
- 38) Dobos, I. (2003). Optimal production-inventory strategies for a HMMS-type reverse logistics system. *International Journal of Production Economics*, 81-82(1), 351-360.
- 39) Dobos, I. (2005). The effects of emission trading on production and inventories in the Arrow-Karlin model. *International Journal of Production Economics*, 93-94(1), 301-308.
- 40) Dobos, I., & Floriska, A. (2007). The resource conservation effect of recycling in a dynamic Leontief model. *International Journal of Production Economics*, 108(1-2), 334-340.
- 41) Dobos, I., & Floriska, A. (2008). The efficiency of remanufacturing in a dynamic input-output model. *Central European Journal of Operations Research*, 16(3), 317-328.
- 42) Dobos, I., & Richter, K. (2003). A production/recycling model with stationary demand and return rates. *Central European Journal of Operations Research*, 11(1), 35-46.
- 43) Dobos, I., & Richter, K. (2004). An extended production/recycling model with stationary demand and return rates. *International Journal of Production Economics*, 90(3), 311-323.
- 44) Dobos, I., & Richter, K. (2006). A production/recycling model with quality considerations. *International Journal of Production Economics*, 104(2), 571-579.
- 45) Dobos, I., & Tallos P. (2011). A dynamic input-output model with renewable resources. *Central European Journal of Operations Research*, DOI: 10.1007/s10100-011-0235-2.

- 46) Dong, T., Zhang, L., Tong, R., & Dong, J. (2006). A hierarchical approach to disassembly sequence planning for mechanical product. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30(5-6), 507-520.
- 47) *European Commission – Environment*. Najdeno 18. maja 2012 na spletnem naslovu <http://ec.europa.eu/environment/waste/index.htm>
- 48) European Parliament, Council (1994, 20. december). Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste. *Official Journal of the European Union*, L 365 (str. 10-23). Brussels: European Parliament, Council, 1994.
- 49) European Parliament, Council (2000, 18. september). Directive 2000/53/EC on end-of life vehicles. *Official Journal of the European Union*, L 269 (str. 34-43). Brussels: European Parliament, Council, 2000.
- 50) European Parliament, Council (2002, 22. julij). The Sixth Community Environment Action Programme. *Official Journal of the European Union*, L 242 (str. 1-15). Brussels: European Parliament, Council, 2002.
- 51) European Parliament, Council (2003, 27. januar). Directive 2002/95/EC on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. *Official Journal of the European Union*, L 37 (str. 19-23). Brussels: European Parliament, Council, 2003.
- 52) European Parliament, Council. (2003, 27. januar). Directive 2002/96/EC on waste electrical and electronic equipment (WEEE). *Official Journal of the European Union*, L 37 (str. 24-39). Brussels: European Parliament, Council, 2003.
- 53) European Parliament, Council (2006, 15. marec). Directive 2006/21/EC on the management of waste from extractive industries. *Official Journal of the European Union*, L 102 (str. 15-33). Strasbourg: European Parliament, Council, 2006.
- 54) European Parliament, Council (2006, 14. junij). Regulation (EC) No 1013/2006 on shipments of waste. *Official Journal of the European Union*, L 190 (str. 1-98). Strasbourg: European Parliament, Council, 2006.
- 55) European Parliament, Council (2006, 6. september). Directive 2006/66/EC on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators. *Official Journal of the European Union*, L 266 (str. 1-14). Strasbourg: European Parliament, Council, 2006.
- 56) European Parliament, Council (2008, 19. november). Directive 2008/98/EC on waste and repealing certain Directives. *Official Journal of the European Union*, L 312 (str. 3-30). Strasbourg: European Parliament, Council, 2008.
- 57) Ferbar, L. (1998). *Nadgradnja modela planiranja materialnih potreb (MRP) z vključitvijo teorije odločitev in teorije iger pri stohastičnem povpraševanju* (doktorska disertacija). Ljubljana: Ekonomska fakulteta.
- 58) Ferrer, G. (1997). The economics of personal computer remanufacturing. *Resources, Conservation and Recycling*, 21(2), 79-108.
- 59) Ferrer, G., & Ayres, R.U. (2000). The impact of remanufacturing in the economy. *Ecological Economics*, 32(3), 413-429.

- 60) Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Dekker, R., van der Laan, E., van Nunen, A.E.E, & van Wassenhove, L.N. (1997). Quantitative models for reverse logistics: A review. *European Journal of Operational Research*, 103(1), 1-17.
- 61) Gehin, A., Zvolinski, P., & Brissaud, D. (2008). A tool to implement sustainable end-of-life strategies in the product development phase. *Journal of Cleaner Production*, 16(5), 566-576.
- 62) Gibbs, J.W. (1873). A Method of Geometrical Representation of the Thermodynamic Properties of Substances by Means of Surfaces. V *Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences* 2 (str. 382-404).
- 63) Grubbström, R.W. (1967). On the Application of the Laplace Transform to Certain Economic Problems. *Management Science*, 13(7), 558-567.
- 64) Grubbström, R.W. (1980). A Principle for Determining the Correct Capital Costs of Work-In-Progress and Inventory. *International Journal of Production Research*, 18(2), 259-271.
- 65) Grubbström, R.W. (1990). The distribution of an additive in a chemical process - an application of input-output theory. *Engineering Costs and Production Economics*, 19(1-3), 333-340.
- 66) Grubbström, R.W. (1991). A Closed-Form Expression for the Net Present Value of a Time-Power Cash Flow Function. *Managerial and Decision Economics*, 12(5), 377-381.
- 67) Grubbström, R.W. (1995). Modelling production opportunities - an historical overview. *International Journal of Production Economics*, 41(1-3), 1-14.
- 68) Grubbström, R.W. (1996). Stochastic relationships of a multi-period inventory process with planned production using transform methodology. *International Journal of Production Economics*, 45(1-3), 407-419.
- 69) Grubbström, R.W. (1998). A net present value approach to safety stocks in a planned production. *International Journal of Production Economics*, 56-57(1), 213-229.
- 70) Grubbström, R.W. (1999). A net present value approach to safety stocks in a multi-level MRP system. *International Journal of Production Economics*, 59(1-3), 361-375.
- 71) Grubbström, R.W. (2007). Transform Methodology Applied to Some Inventory Problems. *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, 77(3), 297-324.
- 72) Grubbström, R.W., Bogataj, M., & Bogataj, L. (2007). A compact representation of distribution and reverse logistics in the value chain. V L.B. Ros McDonnell & L. Bogataj (ur.), *Mathematical economics, Operational research and Logistics*, Serial No. 5. Ljubljana: University of Ljubljana, Faculty of Economics, KMOR.
- 73) Grubbström, R.W., & Huynh, T.T.T (2006). Multi-level, multi-stage capacity-constrained production-inventory systems in discrete time with non-zero lead times using MRP theory. *International Journal of Production Economics*, 101(1), 53-62.
- 74) Grubbström, R.W., & Jiang, Y. (1989). A Survey and Analysis of the Application of the Laplace Transform to Present Value Problems. *Revista di matematica per le scienze economiche e sociale*, 12(1), 43-62.

- 75) Grubbström, R.W., & Lundquist, J. (1977). The Axsäter integrated production-inventory system interpreted in terms of the theory of relatively closed systems. *Journal of Cybernetics*, 7(1-2), 49-67.
- 76) Grubbström, R.W., & Lundquist, J. (1989). *Master scheduling, input-output modelling and production functions. Relationships Between Different Approaches for Modelling Production Opportunities* (Research Report RR-121). Linköping: Linköping Institute of Technology, Department of Production Economics.
- 77) Grubbström, R.W., & Molinder, A. (1994). Further theoretical considerations on the relationship between MRP, input-output analysis and multi-echelon inventory systems. *International Journal of Production Economics*, 35(1-3), 299-311.
- 78) Grubbström, R.W., & Ovrin, P. (1992). Intertemporal generalization of the relationship between material requirements planning and input-output analysis. *International Journal of Production Economics*, 26(1-3), 311-318.
- 79) Grubbström, R.W., & Tang, O. (1998). Modelling rescheduling activities in a multi-period production-inventory system. V *10th International Working Seminar on Production Economics, Igls/Innsbruck, 16-20 Feb. 1998, Pre-prints, Vol. 2* (str. 67-84). Innsbruck: Igls.
- 80) Grubbström, R.W., & Tang, O. (1999). Further developments on safety stocks in an MRP system applying Laplace transforms and input-output analysis. *International Journal of Production Economics*, 60-61(1), 381-387.
- 81) Grubbström, R.W., & Tang, O. (2000). An Overview of Input-Output Analysis Applied to Production-Inventory Systems. *Economic Systems Research*, 12(1), 3-25.
- 82) Grubbström, R.W., & Wang, Z. (2000). Introducing capacity limitations into multi-level, multi-stage production-inventory systems applying the input-output/Laplace transform approach. *International Journal of Production Research*, 38(17), 4227-4234.
- 83) Guo, Y., Liao, W., Cheng, X., & Liu, L. (2006). SimOpt: A new simulation optimization system based virtual simulation for manufacturing system. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 14(5), 577-585.
- 84) Gupta, S.M., & Taleb, K.N. (1994). Scheduling disassembly. *International Journal of Production Research*, 32(8), 1857-1866.
- 85) Habchi, G., & Berchet, C. (2003). A model for manufacturing systems simulation with a control dimension. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 11(1), 21-44.
- 86) Horvat, L., & Bogataj, L. (1999). A market game with the characteristic function according to the MRP and input-output analysis model. *International Journal of Production Economics*, 59(1-3), 281-288.
- 87) Hotelling, H. (1931). The economics of exhaustible resources. *Journal of Political Economy*, 39(2), 137-175.
- 88) Höferle, L. (2008). *Globalizacija logistike odpadkov in reciklaže* (magistrsko delo). Ljubljana: Ekonomska fakulteta.
- 89) Hudson, E.A., & Jorgenson, D.W. (1974). U.S. Energy Policy and Economic Growth, 1975-2000. *The Bell Journal of Economics and Management Science*, 5(2), 461-514.

- 90) Hunhammar, S. (1995). Cycling residues: Potential for increased transportation demands due to recycling of materials in Sweden. *Resources, Conservation and Recycling*, 15(1), 21-31.
- 91) Isard, W. (1971). *Regional Input-output Study: Recollections, Reflections, and Diverse Notes on the Philadelphia Experience*. Cambridge, Mass: MIT Press.
- 92) Johnson, J., Reck, B.K, Wang, T., & Graedel, T.E. (2008). The energy benefit of stainless steel recycling. *Energy Policy*, 36(1), 181-192.
- 93) Kim, K., Song, I., Kim, J., & Jeong, B. (2006). Supply planning model for remanufacturing system in reverse logistics environment. *Computers & Industrial Engineering*, 51(2), 279-287.
- 94) Klaus, H., Rosemann, M. & Gable, G.G. (2000). What is ERP? *Information systems frontiers*, 2(2), 141-162.
- 95) Koopmans, T.C. (ur.) (1951). *Activity Analysis of Production and Allocation: Proceedings of a Conference*. New York: Wiley & Sons.
- 96) Kovačič, D. (2010). Opazovanje vpliva posamičnih reciklažnih tokov v razširjeni MRP teoriji s pomočjo simulacij. V *Dnevi slovenske informatike 2010 - DSI, Portorož, Slovenija, 14.-16. april 2010, Uravnovežite naložbe, tveganja in razvoj za uspeh : zbornik prispevkov* (11 str.). Ljubljana: Slovensko društvo Informatika.
- 97) Kovačič, D. (2011). *Time delays in supply chain management : research results of embedded in MRP models : presented at 5th International conference on industrial engineering and industrial management, Cartagena, 7-9 September 2011*. Cartagena: International Society for Inventory Research (ISIR).
- 98) Kovačič, D., & Bogataj, L. (2009a). Multistage reverse logistics of assembly systems in extended MRP theory. V L. Zadnik Stirn, J. Žerovnik, S. Drobne & A. Lisec (ur.), *Proceedings of the 10th International Symposium on Operational Research SOR '09 in Slovenia, Nova Gorica, September 23-25, 2009. SOR '09 proceedings* (str. 207-218). Ljubljana: Slovenian Society Informatika, Section for Operational Research.
- 99) Kovačič, D., & Bogataj, L. (2009b). The reverse logistics in a virtual supply chain. V *9th ISIR Summer School on Changing Paradigm for Inventory Management in a Supply Chain Context, 25 - 29 August, 2009, Katowice, Poland. Book of abstracts* (str. 11-12). Katowice: Karol Adamiecki University of Economics.
- 100) Kovačič, D., & Bogataj, L. (2011a). Multistage reverse logistics of assembly systems in extended MRP Theory consisting of all material flows. *Central European Journal of Operations Research*, 19(3), 337-357.
- 101) Kovačič, D., & Bogataj, L. (2011b). The reverse logistics including virtual activities : chapter VII. V D.M. Kisperska (ur.), *Changing paradigm for inventory management in a supply chain context* (str. 154-173). Katowice: University of Economics.
- 102) Kovačič, D., & Bogataj, M. (2011a). Lead times and repeated reverse logistic in extended MRP theory. V *10th ISIR Summer School, Istanbul, August 22-26, 2011. Emerging trends in inventory modeling for service and manufacturing : list of participants, program and abstract*. Istanbul: Boğaziçi University.

- 103) Kovačić, D., & Bogataj, M. (2011b). Reverse logistics facility location in extended MRP theory. V: L. Zadnik Stirn, J. Žerovnik, J. Povh, S. Drobne & A. Lisec (ur.), *SOR '11 proceedings* (str. 239-244). Ljubljana: Slovenian Society Informatika, Section for Operational Research.
- 104) Kovačić, D., & Bogataj, M. (2012a). Energy in repeated reverse logistics. V R.W. Grubbström & H.H. Hinterhuber (ur.), *Seventeenth international working seminar on production economics, Innsbruck, 20-24 Feb. 2012, Pre-prints, Vol. 1* (str. 293-305). Innsbruck: Congress Innsbruck.
- 105) Kovačić, D., & Bogataj, M. (2012b). Reverse logistics facility location using cyclical model of extended MRP theory. *Central European Journal of Operations Research*, DOI: 10.1007/s10100-012-0251.
- 106) Kovačić, D., & Bogataj, M. (2012c). Simulating the impact of environmental factors on the extended MRP model. V A. Chikán (ur.), *17th International Symposium on Inventories, Book of Abstracts, August 20-24, 2012- Budapest, Hungary* (str. 144-145). Budapest: Diamond Congress Ltd.
- 107) Kovačić, D., Hontoria, E., Bogataj, M., & Ros, L. (2012). Application of the Extended MRP Theory to a baby food company. *14th International Conference on Operational Research, Book of Abstracts, Trogir, Croatia, September 26-28, 2012* (str. 76). Faculty of Economics Split: Croatian Operational Research Society (CRORS).
- 108) Köchel, P. (2009). *Simulation Optimisation: Approaches, Examples, and Experiences*. Chemnitz: TU Chemnitz, Fakultät für Informatik.
- 109) Köchel, P., & Nieländer, U. (2002). Kanban Optimization by Simulation and Evolution. *Production Planning & Control*, 13(8), 725-734.
- 110) Köchel, P., & Nieländer, U. (2005). Simulation-based optimisation of multi-echelon inventory systems. *International Journal of Production Economics*, 93-94(1), 505-513.
- 111) Köchel, P., & Thiem, S. (2011). Search for good policies in a single-warehouse, multi-retailer system by particle swarm optimisation. *International Journal of Production Economics*, 133(1), 319-325.
- 112) Kümmel, R. (1980). *Growth Dynamics of the Energy Dependent Economy* (Mathematical Systems in Economics). Hain: Cambridge Mass.
- 113) Kümmel, R., Henn, J., & Lindenberger, D. (2002). Capital, labor, energy and creativity: modeling innovation diffusion. *Structural Change and Economic Dynamics*, 13(4), 415–433.
- 114) Kümmel, R., Strassl, W., Gossner, A., & Eichhorn, W. (1985). Technical Progress and Energy Dependent Production Functions. *Journal of Economics*, 45(3), 285-311.
- 115) Lea, R.W. (1996). Plastic incineration versus recycling: a comparison of energy and landfill cost savings. *Journal of Hazardous Materials*, 47(1-3), 295-302.
- 116) Lee, H.B., Cho, N.W., & Hong, Y.S. (2010). A hierarchical end-of-life decision model for determining the economic levels of remanufacturing and disassembly under environmental regulations. *Journal of Cleaner Production*, 18(13), 1276-1283.
- 117) Leontief, W.W. (1928). Die Wirtschaft als Kreislauf. *Archiv für Sozialwissenschaft und Sozialpolitik*, 60(3), 577-623.

- 118) Leontief, W.W. (1951). *The Structure of the American Economy, 1919-1939*. New York, Oxford: Oxford University Press.
- 119) Leontief, W.W. (1966). *Input-output economics*. New York, Oxford: Oxford University Press.
- 120) Leontief, W.W. (1970). Environmental Repercussions and the Economic Structure - An Input-Output Approach. *Review of Economics and Statistics*, 52(3), 262-271.
- 121) Liao, Q., Wu, Z., & Xu, J. (2010). A new production function with technological innovation factor and its application to the analysis of energy-saving effect in LSD. *World Journal of Modelling and Simulation*, 6(4), 257-266.
- 122) Melo, M.T., Nickel, S., & Saldanha-da-Gama, F. (2009). Facility location and supply chain management - A review. *European Journal of Operational Research*, 196(2), 401-412.
- 123) Min, F.Y, Yang, M., & Wang, Z.C. (2010). Knowledge-based method for the validation of complex simulation models. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 18(5), 500-515.
- 124) Mitra, S., & Webster, S. (2008). Competition in remanufacturing and the effects of government subsidies. *International Journal of Production Economics*, 111(2), 287-298.
- 125) Molinder, A. (1995). *Material Requirements Planning Employing Input-Output Analysis and Laplace Transforms* (PROFIL 14, Production-Economic Research in Linköping). Linköping.
- 126) Morris, J. (1996). Recycling versus incineration: an energy conservation analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 47(1-3), 277-293.
- 127) Munson, R. (2007). Recycling Energy: How Industry Is Leading a Clean-Technology Revolution. *The Electricity Journal*, 20(7), 79-85.
- 128) Nakamura, S., & Kondo, Y. (2006). A waste input-output life-cycle cost analysis of the recycling of end-of-life electrical home appliances. *Ecological Economics*, 57(3), 494-506.
- 129) Odum, H. T. (1971). *Environment, power and society*. New York: Wiley & Sons.
- 130) Odum, H. T. (1996). *Environmental accounting*. New York: Wiley & Sons.
- 131) Organisation for Economic Co-operation and Development - OECD (2001, 16. maj). *OECD Environmental Strategy for the First Decade of the 21st Century*. Paris: OECD, 2001.
- 132) Orlicky, J.A. (1975). *Material Requirements Planning*. New York: McGraw-Hill.
- 133) Östlin, J., Sundin, E., & Björkman, M. (2009). Product life-cycle implications for remanufacturing strategies. *Journal of Cleaner Production*, 17(11), 999-1009.
- 134) Pigou, A. C. (1920). *The Economics of Welfare*. London: Macmillan.
- 135) Pokharel, S. & Liang, Y. (2012). A model to evaluate acquisition price and quantity of used products for remanufacturing. *International Journal of Production Economics*, 138(1), 170-176.
- 136) Pravilnik o ravnanju z odpadki. *Uradni list RS št. 84/1998* (1998, 11. december).
- 137) Rant, Z. (1956). Exergie, ein neues Wort für Technische Arbeitsfähigkeit. *Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*, 22(1), 36-37.

- 138) Resolucija o Nacionalnem programu varstva okolja 2005–2012. *Uradni list RS št. 2/2006* (2006, 6. januar).
- 139) Richter K. (1994). An EOQ repair and waste disposal mode. V R.W. Grubbström, H.H. Hinterhuber & J. Lundquist (ur.), *Proceedings of the Eight International Working Seminar on Production Economics, Igls-Innsbruck, Austria, 21-25 Feb. 1994, Vol. 3* (str. 83-91). Innsbruck: Igls.
- 140) Richter, K. (1996a). The EOQ repair and waste disposal model with variable setup numbers. *European Journal of Operational Research*, 95(2), 313-324.
- 141) Richter, K. (1996b). The extended EOQ repair and waste disposal model. *International Journal of Production Economics*, 45(1-3), 443-447.
- 142) Richter, K. (1997). Pure and mixed strategies for the EOQ repair and waste disposal problem. *OR Spektrum*, 19(2), 123-129.
- 143) Richter, K., & Dobos, I. (1999). Analysis of the EOQ repair and waste disposal model with integer setup numbers. *International Journal of Production Economics*, 59(1-3), 463-467.
- 144) Richter, K., & Gobsch, B. (2003). The market-oriented dynamic product recovery model in the just-in-time framework. *International Journal of Production Economics*, 81-82(1), 369-374.
- 145) Richter, K., & Sombrutzki, M. (2000). Remanufacturing planning for the reverse Wagner/Whitin models. *European Journal of Operational Research*, 121(2), 304-315.
- 146) Richter, K., & Weber, J. (2001). The reverse Wagner/Whitin model with variable manufacturing and remanufacturing cost. *International Journal of Production Economics*, 71(1-3), 447-456.
- 147) Sandelin, B. (1976). On the Origin of the Cobb-Douglas Production Function. *Economy and History*, 19(2), 117-123.
- 148) Schrady, D.A. (1967). A deterministic inventory model for repairable items. *Naval Research Logistic Quarterly*, 14(3), 391-398.
- 149) Sciubba, E. (2003). Extended exergy accounting applied to energy recovery from waste: The concept of total recycling. *Energy*, 28(13), 1315-1334.
- 150) Segerstedt, A. (1996). Formulas of MRP. *International Journal of Production Economics*, 46-47(1), 127-136.
- 151) Silver, E.A., & Meal, H.C. (1973). A heuristic for selecting lot size requirements for the case of deterministic time-varying demand rate and discrete opportunities for replenishment. *Production and Inventory Management*, 14(2), 64-74.
- 152) Spiegel, M.R. (1965). *Laplace transforms*. New York: McGraw-Hill.
- 153) Tang, O. (2000). Modelling stochastic lead times in a production-inventory system based on the Laplace transform method. *International Journal of Production Research*, 38(17), 4217-4226.
- 154) Tang, O., & Grubbström, R.W. (2002). Planning and replanning the master production schedule under demand uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 78(3), 323-334.

- 155) Tang, O., & Grubbström, R.W. (2003). The detailed coordination problem in a two-level assembly system with stochastic lead times. *International Journal of Production Economics*, 81-82(1), 415-429.
- 156) Tang, O., & Grubbström, R.W. (2005). Considering stochastic lead times in a manufacturing/remanufacturing system with deterministic demands and returns. *International Journal of Production Economics*, 93-94(1), 285-300.
- 157) Tang, O., & Grubbström, R.W. (2006). On using higher-order moments for stochastic inventory systems. *International Journal of Production Economics*, 104(2), 454-461.
- 158) Tang, O., Grubbström, R.W., & Zanoni, S. (2007). Planned lead time determination in a make-to-order remanufacturing system. *International Journal of Production Economics*, 108(1-2), 426-435.
- 159) Ten Raa, T. (2005). *The Economics of Input-Output Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press.
- 160) Teunter, R.H. (1998). *Economic ordering quantities for repairable/manufacturable item inventory systems*. Magdeburg: Otto-von-Guericke University of Magdeburg, Faculty of Economics and Management.
- 161) Teunter, R.H., & Vlachos, D. (2002). On the necessity of a disposal option for returned items that can be remanufactured. *International Journal of Production Economics*, 75(3), 257-266.
- 162) Thery, R., & Zarate, P. (2009). Energy planning: a multi-level and multicriteria decision making structure proposal. *Central European Journal of Operations Research*, 17(3), 265-274.
- 163) Thierry, M., Salomon, M., van Nunen, J.V., & van Wassenhove, L.V. (1995). Strategic issues in product recovery management. *California Management Review*, 37(2), 114-135.
- 164) Thormark, C. (2001). Conservation of energy and natural resources by recycling building waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 33(2), 113-130.
- 165) Thorstenson, A. (1988). *Capital Costs in Inventory Models - A Discounted Cash Flow Approach* (PROFIL 8, Production-Economic Research in Linköping). Linköping.
- 166) Tintner, G., Deutsch, E., Rieder, R., & Rosner, P. (1977). A Production Function for Austria Emphasizing Energy. *De Economist*, 125(1), 75-94.
- 167) United Nations Environment Programme - UNEP (1987, 16. september). *The Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*. Montreal: United Nations, 1987.
- 168) United Nations Environment Programme - UNEP (1989, 22. marec). *Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal*. Basel: United Nations, 1989.
- 169) United Nations Framework Convention on Climate Change - UNFCCC (1997, 11. december). *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Kyoto: United Nations, 1997.
- 170) Van Dijk, N.M, & Van der Sluis, E. (2008). Practical optimization by OR and simulation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 16(8), 1113-1122.

- 171) Vazsonyi, A. (1954). The Use of Mathematics in Production and Inventory Control. *Management Science*, 1(1), 70-85.
- 172) Vazsonyi, A. (1955). The Use of Mathematics in Production and Inventory Control II. *Management Science*, 1(3-4), 207-223.
- 173) Vazsonyi, A. (1958). *Scientific Programming in Business and Industry*. New York: Wiley & Sons.
- 174) Vellini, M., & Savioli, M. (2009). Energy and environmental analysis of glass container production and recycling. *Energy*, 34(12), 2137–2143.
- 175) Wagner, H.M., & Whitin, T.H. (1958). Dynamic version of the economic lot size model. *Management Science*, 5(1), 89-96.
- 176) Waldner, J.B. (1992). *CIM: Principles of computer integrated manufacturing*. New York: Wiley & Sons.
- 177) Wei, T. (2007). Impact of energy efficiency gains on output and energy use with Cobb-Douglas production function. *Energy Policy*, 35(4), 2023-2030.
- 178) Williams, J.A.S., Wongweragiat, S., Qu, X., McGlinch, J.B., Bonawit-tan, W., Choi, J.K., & Schiff, J. (2007). An automotive bulk recycling planning model. *European Journal of Operational Research*, 177(2), 969-981.
- 179) Winston, W.L. (1997). *Operations Research: Applications and Algorithms* (3rd edition). Belmont: Wadsworth Publishing Company.
- 180) Zakon o varstvu okolja. *Uradni list RS št. 41/2004* (2004, 8. april).
- 181) Žaja, S., Blažeka, Ž., Czurda, D., Krajnc, U., Langerholc, M., Ravnik, J., & Štelcer, F. (2002). *Razvojni program ravnanje z odpadki Dolenjske*. Maribor: IEI-Institut za ekološki inženiring d.o.o.