

UNIVERZA V LJUBLJANI  
EKONOMSKA FAKULTETA

**MAGISTRSKO DELO**

**ANALIZA STRATEGIJE VZDRŽEVANJA  
VOZIL S POMOČJO SIMULATORJA PO  
NAČELU SISTEMSKÉ DINAMIKE**

Ljubljana, junij 2007

Gorazd Lednik

## IZJAVA

Študent Gorazd Lednik izjavljam, da sem avtor tega magistrskega dela, ki sem ga napisal pod mentorstvom prof. ddr. Ludvika Bogataja in skladno s 1. odstavkom 21. člena Zakona o avtorskih in sorodnih pravicah dovolim objavo magistrskega dela na fakultetnih spletnih straneh.

V Ljubljani, dne 1. junij 2007

Podpis:

# Vsebina

<b>1</b>	<b>Uvod.....</b>	<b>1</b>
1.1	Problematika in namen dela.....	1
1.2	Cilj magistrskega dela .....	4
1.3	Zasnova dela.....	4
<b>2</b>	<b>Modeliranje in simulacije kot pomoč pri odločanju.....</b>	<b>6</b>
2.1	Osnovni principi modeliranja.....	6
2.2	Osnovni principi simulacij.....	7
2.3	Vrednotenje in testiranje simulacijskih modelov .....	8
<b>3</b>	<b>Osnove sistemske dinamike.....</b>	<b>10</b>
3.1	Diagrami vpliva.....	11
3.2	Strukture in obnašanje dinamičnih sistemov .....	12
3.2.1	Osnovne oblike obnašanja dinamičnih sistemov .....	13
3.2.2	Izpeljane oblike obnašanja dinamičnih sistemov .....	14
3.3	Pomen nivojev in pretokov v sistemski dinamiki.....	15
3.4	Računalniška orodja za izgradnjo modelov .....	17
<b>4</b>	<b>Pregled možnih strategij vzdrževanja opreme in vozil.....</b>	<b>18</b>
4.1	Razvoj strategij vzdrževanja.....	18
4.1.1	Popravila okvar .....	19
4.1.2	Preventivno vzdrževanje.....	19
4.1.3	CBM (pogojno vzdrževanje).....	20
4.1.4	Določitev primerne strategije .....	20
4.2	TPM (popolno vzdrževanje proizvodnih sredstev).....	22
4.3	Sistemski pristop k upravljanju vzdrževanja .....	23
<b>5</b>	<b>Model vzdrževanja vozil .....</b>	<b>25</b>
5.1	Diagram vplivov v modelu vzdrževanja vozil.....	27
5.2	Izgradnja simulacijskega modela po posameznih modulih.....	29
5.2.1	Modul upravljanja z voznim parkom.....	29
5.2.2	Vpliv preventivnega vzdrževanja na okvare.....	33
5.2.3	Modul upravljanja z vzdrževalnimi nalogami.....	36
5.2.4	Modul upravljanja s človeškimi viri.....	41
5.2.5	Modul spremljanja prihodkov in odhodkov.....	43
5.3	Dopolnitev modela za prilagajanje različnim spremembam zunanjega povpraševanja .....	47
5.4	Izgradnja simulacijskega vmesnika.....	50
<b>6</b>	<b>Simulacije in analiza ter vrednotenje strategij.....</b>	<b>53</b>

<b>6.1 Analiza strategij pri konstantnem obsegu voznega parka.....</b>	<b>53</b>
6.1.1 Analiza pri podaljšanem času simulacije.....	56
<b>6.2 Občutljivostna analiza .....</b>	<b>57</b>
6.2.1 Občutljivostna analiza spremembe parametrov .....	57
6.2.2 Občutljivostna analiza deleža okvar.....	58
<b>6.3 Analiza stopnje okvar .....</b>	<b>60</b>
<b>6.4 Analiza pri spremembi stroškov nabave vozil .....</b>	<b>61</b>
<b>6.5 Analiza odvisnosti povprečne starosti vozil od strategije obnovitev ...</b>	<b>63</b>
<b>6.6 Analiza prilagajanja spremembam zunanjega povpraševanja .....</b>	<b>65</b>
6.6.1 Sprememba zunanjega povpraševanja izražena s konstantno linearno rastjo.....	67
6.6.2 Sprememba zunanjega povpraševanja izražena s stopničasto funkcijo	69
6.6.3 Sprememba zunanjega povpraševanja izražena s sinusoido .....	70
6.6.4 Slučajne spremembe zunanjega povpraševanja izražene s stopničasto funkcijo .....	72
<b>6.7 Nadgradnja simulatorja z vključitvijo modela za večkriterijsko odločanje .....</b>	<b>73</b>
6.7.1 Določitev uteži posameznim kriterijem.....	74
6.7.2 Določitev ocen posameznim kriterijem .....	76
6.7.3 Izvajanje simulacij in ocenjevanje posameznih variant .....	76
6.7.4 Občutljivostna analiza spremembe parametrov pri večkriterijskem odločitvenem modelu.....	78
<b>7 Sklep .....</b>	<b>79</b>
<b>Literatura in viri.....</b>	<b>82</b>
Literatura.....	82
Viri .....	84
<b>Slovarček uporabljenih tujih izrazov.....</b>	<b>85</b>
<b>Seznam prilog .....</b>	<b>85</b>

# 1 Uvod

Podjetja in organizacije, ki imajo v sklopu svoje dejavnosti tudi večje število transportnih vozil, se srečujejo s problemom optimalnega vzdrževanja voznega parka. Pojavljajo se številna vprašanja, kot na primer:

- *Kakšno je optimalno število vozil?*
- *Ali je potrebno zmanjšati povprečno starost vozil, ali pa za dejavnost zadostujejo starejša vozila ?*
- *Naj vzdrževanje izvajajo zunanji sodelavci?*
- *Če vzdržujemo vozni park sami, kakšno je optimalno število vzdrževalcev?*
- *Ali naj vzdržujemo le ob okvarah, ali naj uvedemo preventivno vzdrževanje?*

To so le nekatera vprašanja, ki se pojavijo pri načrtovanju strategij vzdrževanja voznih parkov. Odgovori nanje niso preprosti, poleg tega pa se ukrepi, s katerimi želimo odgovoriti na ta vprašanja, medsebojno prepletajo in učinkujejo, zaradi česar lahko ukrepi privedejo do številnih učinkov, ki jih nismo predvideli. Kot primeren način za preučevanje in analiziranje različnih strategij in učinkov teh strategij v različnih pogojih se lahko uporabi tudi simulator.

## 1.1 Problematika in namen dela

Namen magistrskega dela je ustvariti simulacijski model, ki bo koristil upravljavcem in managerjem voznih parkov pri čim bolj učinkovitem upravljanju z transportnimi vozili.

Pri upravljanju z voznimi parki, kot tudi z drugo opremo, se seveda postavlja veliko vprašanj, na katera je potrebno natančno odgovoriti, če želimo prispevati k učinkovitosti podjetja. Vprašanja so povezana z odločitvami, kot so nabava vozil, načini vzdrževanja, načrtovanje kapacitet vzdrževalcev, zelena povprečna starost vozil in podobno. S temi odločitvami želimo seveda čim bolj povečati učinkovitost voznega parka. Hkrati pa vsaka politika vzdrževanja opreme vpliva na stroške, ki manjšajo dobiček podjetja. Pri vzdrževanju opreme na splošno imamo naslednje možnosti ( Bivona, 2005, str.3 in tudi Pitt in ostali, 2006, str. 154):

- vzdrževanje oz. popravila ob okvari,
- preventivno vzdrževanje,
- pogojno vzdrževanje - CBM (conditioned based maintenance).

V začetni fazi so se stroji popravljali le ob okvarah, ker oprema še ni bila predraga. Z večanjem stroškov opreme in željo po čim večji zanesljivosti opreme se uvede preventivno vzdrževanje. Naslednja faza je pogojno vzdrževanje, ko želimo opremo zamenjati točno takrat, ko je to najbolj primerno. To pomeni ne prezgodaj in ne prepozno. Pogojno vzdrževanje je pogojeno s konstantnim spremljanjem stanja opreme in strojev ter merjenjem delovanja. Ta način vzdrževanja lahko zaradi tega vodi v velike stroške in je primeren le za najdražjo opremo.

Vedno večje zahteve po učinkovitem vzdrževanju privedejo do metode TPM - total productivity maintenance (popolno vzdrževanje proizvodnih sredstev), ki jo je uvedel Nakajima (Nakajima, 1988). S to metodo povežemo vse aspekte vzdrževanja v celoto in cilj je čim uspešneje vplivanje tega segmenta organizacije na celotno uspešnost organizacije. TPM koncept povezuje prakso preventivnega vzdrževanja s konceptom popolne kvalitete, kar pomeni vključitev zaposlenih, odločanje na osnovi podatkov, težnja k nič okvaram in strateška usmerjenost (Russel, 2000, str. 755).

Z izgradnjo simulatorja bo možno preizkušati razne strategije, ki izhajajo iz teh osnovnih vrst, oziroma politik vzdrževanja. Te strategije lahko kombiniramo tudi z drugimi ukrepi in proučujemo posledice različnih odločitev, ki se sprejemajo v zvezi z upravljanjem vzdrževanja vozil.

Največja prednost poslovnih simulatorjev je v tem, da z njimi dobimo pravzaprav neke vrste laboratorij za preučevanje ukrepov, ki jih bomo izvedli v realnem svetu. Hkrati pa v okviru naših dejavnosti s simulatorjem ukrepi ne povzročajo nobenih negativnih posledic, ne za nas, ne za naše okolje. Še več, negativne posledice lahko s simulatorjem predvidimo in jih v realnem okolju tudi preprečimo.

Orodje, ki ga bomo uporabljali pri izgradnji simulatorja, je sistemska dinamika. Sistemsko dinamiko nekateri obravnavajo kot samostojno disciplino. Njen začetnik je Jay W. Forrester (Forrester, 1973 in 1976). Nekateri drugi jo obravnavajo le kot eno od zvrsti simulacij, in sicer vrsto zvezne simulacije (Čerić, 1993, str. 245 ali Pidd, 1996, str. 181). Izhaja iz teorije upravljanja in ima svoje korenine v teoriji sistemov ter kibernetiki.

Znani so že mnogi modeli, ki so nastali po principih sistemske dinamike. Zelo široka je uporaba v ekonomiji (proizvodnja, zaloge, logistične verige, rast podjetij, vpliv na konkurenco...), družbenih odnosih, zdravstvu, vplivih človeških dejavnosti na podnebje, biologiji in tudi drugih področjih.

V literaturi so do sedaj obdelani že nekateri modeli po principu sistemske dinamike, ki preučujejo čim bolj učinkovito vzdrževanje opreme. Znan je model, ki preučuje vzdrževanje opreme v naftni industriji (Sterman, 2000, str. 66), potem model, ki preučuje učinke vzdrževanja na osnovi principa TPM (Thun, 2004), model, ki obravnava vzdrževanje motorjev pri letalskih prevozi (Varelis, 2002), model, ki preučuje različne strategije vzdrževanja pri proizvodnih sistemih z omejeno stopnjo proizvodnje in prilagodljivo kapaciteto (Crespo Marquez, 2003) in pa model, ki preučuje vzdrževanje v podjetjih, ki se ukvarjajo z avtobusnimi prevozi (Bivona, 2005).

Naš model vzdrževanja vozil se glede na Stermanovega razlikuje v tem, da so tam kot nivo modelirane okvare, v našem primeru pa je večji poudarek na aktivnostih vzdrževanja in kot nivo modeliramo število vozil v okvari in število vozil v postopku preventivnega vzdrževanja. Na ta način modeliramo dogodke v delavnici kot dva vzporedna tokova. To je zelo praktično pri izvajanju simulacij in konkretni predstavi o stanju v voznem parku. Omogoča nam stalno spremljanje razpoložljivega števila vozil.

Model se naslanja tudi na model vzdrževanja letalskih motorjev (Varelis, 2002), ki je zgrajen po principu posameznih modulov. Glede na ta model združimo modula preventivnega vzdrževanja in okvar vozil, kar prav tako omogoča lažje spremljanje dogodkov v voznem parku. Pri našem modelu ne upoštevamo vzdrževanje v tovarni in izločanje motorjev. Prilagodimo pa tudi modul spremljanja stroškov in dodamo v model prihodke, ki so odvisni od razpoložljivosti vozil kot posledica dobre ali slabe strategije vzdrževanja. To nam omogoča spremljanje dobička in primerjavo posameznih strategij glede na dobiček. Model ima osnove

tudi v modelu vzdrževanja v avtobusnih podjetjih (Bivona, 2005). V primerjavi s tem modelom je tu prav tako večji poudarek na vzdrževalnih aktivnostih in spremljanju le-teh. Model uporablja tudi starostno verigo po zgledu analize primernosti vojaške opreme (Alfred, 2000), ki služi za spremljanje starosti opreme. Starostne razrede priredimo tako, da so primernejši za spremljanje cestnih vozil. Priredimo odločitvena pravila, ki omogočajo menjavanje in nabavljanje novih vozil. Upoštevamo tudi upravljanje s človeškimi viri, podobno kot ga vsebuje tudi Varelisev model, vendar priredimo našemu modelu samostojni model zaposlovanja (Sterman, 2000). Hkrati model nadgradimo z odločitvenimi pravili, ki omogočajo spremljanje reakcij v voznem parku (spremembe števila vozil, spremembe stopnje zaposlovanja) kot odgovor na spremembe zunanjega povpraševanja ob različnih reakcijskih dobah v podjetju.

Prednost modela pred vsemi ostalimi pa je tudi v enostavni razgradljivosti in samostojnosti posameznih modulov. Tako lahko opravljamo tudi analize po posameznih moduli neodvisno od ostalih komponent sistema. Modul upravljanja z vozili se lahko uporablja tudi za kakršnokoli drugo opremo, kjer želimo analizirati vplive nabave in menjave opreme na starost opreme. Prav tako se modul upravljanja s človeškimi viri lahko uporablja samostojno in je uporaben tudi v drugih primerih. Modul vpliva preventivnega vzdrževanja na okvare pa omogoča zelo hitro in enostavno zajemanje podatkov o stopnjah okvar in vplivih preventivnega vzdrževanja na različne tipe vozil in ob manjših prilagoditvah tudi na ostalo opremo.

Model pa je za razliko od ostalih do sedaj znanih nadgrajen tudi z modelom za večkriterijsko odločanje in AHP metodo za določitev uteži kriterijem. To omogoča analizo simulacij in medsebojno primerjavo strategij tudi ob upoštevanju večjega števila kriterijev, ki so lahko pomembni za upravljavce voznih parkov.

Model naj bi vseboval predvsem način, kako vključiti v sistem naše odločitve in ugotavljanja, kako bodo naše odločitve vplivale na sistem. Odločitve so povezane predvsem z vplivanjem na različne faktorje, ki so pomembni za učinkovito upravljanje voznega parka in na katere lahko vplivamo. Pomembnejši faktorji so: obseg voznega parka, nabavljanje novih vozil, strategije vzdrževanja, količina preventivnega vzdrževanja, število in usposobljenost vzdrževalcev in podobno. Zanima nas, kako bo to vplivalo na posamezne kriterije, ki vplivajo na uspeh podjetja skozi ravnanje z opremo, kot so dobiček, stopnja odpovedi, količina popravil in razpoložljivost vozil.

Simulator zgradimo preko naslednjih modulov:

- upravljanje z vozili (stopnja nabave, menjave vozil, povprečna starost),
- vpliv preventive na okvare (količina preventivnega vzdrževanja),
- upravljanje vzdrževalnih nalog (usklajevanje odpravljanja okvar z nalogami preventivnega vzdrževanja),
- upravljanje s človeškimi viri (zaposlovanje, predvidevanje odpovedi, izobraževanje in uvajanje),
- vpliv odločitev na dobiček (prihodki in odhodki, povezani s strategijami upravljanja).

Te module združimo v enoten model, ki bo povzemal razmerja znotraj sistema in interakcije med posameznimi moduli. Na ta način dobimo model sistema, ki se lahko proučuje z računalniškimi orodji prirejenimi za simulacijo. Model sistema pa je hkrati zgrajen tako, da lahko module proučujemo tudi posamezno, neodvisno od drugih modulov ter tako lahko posamezne komponente sistema preučujemo tudi ločeno od vplivov drugih.

## 1.2 Cilj magistrskega dela

Cilj magistrskega dela je ustvariti model sistema upravljanja z voznim parkom, ki bo omogočal analize strategij vzdrževanja le tega. Poleg tega je cilj tudi omogočiti proučevanje posameznih strategij in njihovo medsebojno primerjanje ter na ta način predlagati primernost posameznih strategij glede na različne kriterije, ki se zdijo upravljavcem pomembni.

Cilj magistrske naloge je tudi ponuditi simulator, ki bo omogočal managerjem in upravljavcem proučevati in analizirati posamezne strategije upravljanja v varnem okolju, ne da bi jim pri tem bilo potrebno poznati metode sistemske dinamike ali celo posamezne enačbe, ki definirajo povezave med elementi sistema. Tak način analize posameznih strategij ne predstavlja nevarnosti za podjetje v smislu eksperimentiranja s sredstvi in človeškimi viri. Tako lahko šele po temeljitom preučevanju vplivov posameznih strategij v simulatorju izberemo pravo v konkretnem realnem primeru.

Cilj dela je prav tako prilagoditi do sedaj opisane modele v literaturi, ki se ukvarjajo z vzdrževanjem po načelih sistemske dinamike na modelu, ki bo obravnaval vzdrževanje cestnih vozil. Osnovna razlika glede na Stermanov model je v tem, da so kot osnovni nivo pri programiranju določene okvare opreme, v tem primeru pa so osnovni nivo vozila. Imamo dva osnovna nivoja v modulu upravljanja z vzdrževalnimi nalogami, in sicer nivo vozil v okvari in nivo vozil na preventivnem vzdrževanju. Prednost je predvsem v veliko preglednejšem izvajanju simulacij in spremljanju razmer v voznem parku. Preglednost modela je omogočena predvsem zaradi zgradbe z moduli podobno kot pri modelu za vzdrževanje letalskih motorjev (Varelis, 2002), vendar so moduli prirejeni cestnim vozilom in se lahko uporabljajo tudi samostojno. Glede na model upravljanja vzdrževanja v avtobusnih podjetjih (Bivona, 2005) je model prirejen za cestna vozila na splošno in daje veliko večji poudarek samemu vzdrževanju vozil, torej dogodkom v delavnici.

## 1.3 Zasnova dela

Metode dela temeljijo na analizi do sedaj opisanih modelov v literaturi, kot so splošni modeli Stermana, Thuna ter modela Varealisa in Bivone, ki se ukvarjata z vzdrževanjem transportnih sredstev, in Alfredovega modela, ki se ukvarja z vojaško opremo. Prilagodimo jih modelu vzdrževanja cestnih vozil, ki ga poskušamo čim bolj približati praktičnim izkušnjam pri vzdrževanju in upravljanju z voznimi parki. Na koncu izberemo hipotetični vozni park, na katerem izvedemo različne analize, ki prikažejo uspešnost različnih strategij v različnih pogojih (analize pri konstantnem obsegu voznega parka, analize prilagajanja obsega voznega parka različnim spremembam zunanega povpraševanja, občutljivostna analiza, proučevanje strategij pri nabavi različnih vozil in večkriterijska analiza).

V uvodnem poglavju je opredeljena problematika in namen dela, določen je cilj ter podana zasnova.



Drugo poglavje na kratko poda osnovna dejstva o modeliranju in simulacijah. Pokažemo na razmerja med sistemom in modelom ter osebo, ki gradi model. Opredeljene so osnovne vrste modelov in način, kako se pristopi k izgradnji modelov. Nato so podani osnovni pojmi o simulacijah. Tu so na kratko opisane prednosti in slabosti simulacijskega modeliranja ter priporočeni koraki pri izvajanju simulacij. Na kratko je opisano tudi vrednotenje in testiranje simulacijskih modelov.

Naslednje poglavje se posveča osnovnim principom pri simulacijah po načelu sistemske dinamike. Tu se seznanimo z značilnostmi dinamičnih sistemov, ki povzročajo različne odmike od naših predvidevanj v delovanju sistemov. Opisani so diagrami vplivov delujočih na principu povezav, ki nakazujejo razmerja med vzrokom in posledico. Prikazane so najbolj značilne oblike obnašanja dinamičnih sistemov. Opisani so tudi pomen nivojev in pretokov pri simuliranju sistemov. Na koncu so prikazana še računalniška orodja in osnovni gradniki, ki omogočijo izgradnjo modela s pomočjo računalniških orodij.

V četrtem poglavju so opisane strategije vzdrževanja vozil in opreme na splošno. Prikazane so osnovne tri strategije, ki so se razvile vzporedno z razvojem opreme, njihove prednosti in slabosti ter primernost uporabe posamezne strategije v odvisnosti od karakteristik opreme, ki jo je potrebno vzdrževati. Opisani so tudi koncept popolnega vzdrževanja proizvodnih sredstev (TPM) ter različne ovire, na katere lahko naletimo pri uvajanju koncepta v organizacijo.

Peto poglavje prikazuje izgradnjo simulacijskega modela. Opisanih je vseh pet modulov. S pomočjo gradnikov računalniškega orodja so prikazani diagrami vpliva v posameznih modulih. Prikazane in opisane so tudi pomembnejše enačbe, ki določajo vpliv med posameznimi elementi. Izdelana so tudi odločitvena pravila, ki omogočajo analiziranje odziva prilagajanja obsega voznega parka na različne spremembe zunanjega povpraševanja. Na koncu so izdelani še vmesniki, ki omogočajo enostavno izvajanje analiz in spreminjanje parametrov pri preučevanju strategij pod različnimi pogoji.

Šesto poglavje prikazuje izvajanje simulacij in preučevanje strategij na osnovi teh simulacij. V prvi fazi določimo osnovne strategije, nato sledi izvajanje simulacij. Najprej simuliramo različne strategije pri konstantnem obsegu voznega parka. Sledi občutljivostna analiza, kjer preučujemo, kako se spreminja rezultat pri najboljši varianti, če posamezne odločitvene parametre spreminjamo za eno enoto. Izdelana je tudi občutljivostna analiza stopnje okvar, kjer analiziramo, kako stabilna ostane izbrana strategija ob spremembah stopnje okvar oz. za koliko se lahko zmotimo v predvidevanjih o stopnji okvar, da bo sistem ostal stabilen ob izbrani varianti. Sledi analiza stopnje okvar in analiza odvisnosti povprečne starosti vozil od stopnje obnovitev voznega parka. Potem opravimo še analizo prilagajanja obsega voznega parka ob različnih spremembah zunanjega povpraševanja. Sledi nadgradnja simulatorja z modelom za večkriterijsko odločanje.

Zadnje poglavje vsebuje sklep, v katerem so opisani rezultati in prednosti, ki jih na ta način dosežemo pri odločanju o uvajanju strategij vzdrževanja voznega parka.

## 2 Modeliranje in simulacije kot pomoč pri odločanju

Modele sistemov gradimo predvsem zato, da bolje spoznamo njihovo delovanje in zakonitosti ter jih posledično lažje upravljamo. Iz istega razloga s pomočjo modelov izvajamo simulacije delovanja sistema. Model mora čim bolj posnemati delovanje bistvenih elementov sistema.

Dober model je tisti, ki zajame najpomembnejše elemente in njihove najpomembnejše lastnosti glede na izbrani upravljavski vidik oziroma kriterij upravljanja, medtem ko množico manj pomembnih podrobnosti spusti (Bogataj, 2000).

### 2.1 Osnovni principi modeliranja

Modeliranje lahko opišemo kot razmerje med naslednjo trojico (Kljajić, 2002, str.105):

$$(O,S,M) \quad (1)$$

kjer so:

- O - subjekt, ki preučuje (opazovalec),
- S - objekt, ki se proučuje, je realen in neodvisen od opazovalca, v bistvu je to nek sistem,
- M - model, ki ga subjekt izdelava na osnovi preučevanja.

V procesu preučevanja pride do medsebojne interakcije in vplivov vseh treh komponent. Sam sistem oziroma objekt preučevanja, kar v tem primeru pomeni isto, je podvržen preučevanju subjekta, ki ga proučuje, se pravi človeka in na osnovi tega človek zgradi model. Model temelji na prvinah sistema, kakor ga vidi opazovalec. Cilj postopka je vplivanje na sistem oziroma objekt opazovanja. Tako model vpliva preko človeka na sistem oziroma objekt preučevanja, sistem pa znova nazaj vpliva na človeka in na model, ki prav tako vpliva na človeka. Torej so sistem, model sistema in človek, opazovalec sistema medsebojno povezani in vplivajo drug na drugega.

Med modeli ločimo (Bogataj, 2000):

- ikone,
- analogne modele,
- simbolne modele.

Ikona je fizični model, ki ima izgled realnega objekta Med analogne modele spadajo predvsem grafi, ki ponazarjajo obnašanje nekega sistema ali objekta. Najvišjo stopnjo abstrakcije pa dosegajo simbolni ali matematični modeli.

Splošna priporočila za izgradnjo modelov (Gordon, 1977, str. 34) pa so naslednja:

- 1) Mejo sistema z okolico je potrebno izbrati tako, da sistem oziroma njegov model zajema le karakteristike in elemente, ki so pomembni za delovanje sistema, ostale uvrstimo v okolico.

- 2) Modeli ne smejo biti preveč kompleksni in detajlni, ampak morajo vsebovati le relevantne elemente sistema, preveč kompleksni modeli so prezahtevni za ocenjevanje in razumevanje.
- 3) Model prav tako ne sme biti preveč poenostavljen, saj potem nekatere lastnosti, ki so pomembne za delovanje sistema v modelu, ne bi prišle do izraza.
- 4) Model je pametno razstaviti na več manjših modulov, ki jih je lažje preveriti in ovrednotiti.
- 5) Pri izgradnji modelov je priporočeno delati po korakih in počasi razvijati model do primerne stopnje, obenem pa se dobro seznaniti z vsemi moduli.
- 6) Na koncu je potrebno preveriti logično in kvantitativno pravilnost modela.

## 2.2 Osnovni principi simulacij

Simuliranje delovanja sistemov je metoda, ki nam prinaša mnoge koristi. Med drugim:

- razumevanje sistema in problema ter definiranje ključnih faktorjev,
- oblikovanje sistema in analizo ter vrednotenje alternativnih rešitev,
- analizo delovanja sistema, kot so kapacitete posameznih elementov, ozka grla in podobno,
- iskanje optimalnega vodenja sistema,
- predvidevanje delovanja sistema v prihodnosti,
- izobraževanje in pripravljanje oseb, ki bodo v praksi vodile sistem, pridobivanje izkušenj o delovanju sistema (obstajajo mnoge znane igre s tega področja, ki služijo za izobraževanje upravljalcev sistemov, tako s področja logistike, ekonomije, vojnih operacij ter upravljanja zapletenih in dragih naprav).

Najpogostejši razlogi za simulacije so predvsem v tem, da je eksperimentiranje z realnim sistemom predrago ali celo nemogoče, analitični model nima rešitve, ali pa je analitični model prezahteven za razumevanje (preveč in prezapletene diferencialne enačbe).

V splošnem se simulacije izvajajo v naslednjih korakih (Pritsker, 1986, str 54):

- 1) Formulacija problema - kaj bomo simulirali, kaj so elementi, omejitve, okolje, cilji, spremenljivke ...
- 2) Izgradnja modela - statični opis, dinamični opis, definicije stanj ...
- 3) Priprava podatkov - zahteve pri vseh, ustvarjanje baze podatkov, potrebna natančnost ...
- 4) Translacija modela - v primeren programski jezik.
- 5) Verifikacija modela - če računalniški model ustreza zamisli izdelovalca modela.
- 6) Vrednotenje modela - je model dovolj dobro opisal stanje sistema.
- 7) Planiranje eksperimentov - določitev pogojev simulacijskega eksperimenta.
- 8) Izvedba eksperimenta
- 9) Analiza rezultatov - ovrednotenje izhodnih podatkov.

10) Dokumentacija - na koncu je potrebno simulacijo še dokumentirati kot navodila in pomoč pri dejanskem ravnanju s sistemom.

Koraki izvajanja simulacij prirejeni okolju sistemske dinamike (Sterman, 2000, str. 86) so naslednji:

- 1) Artikulacija oziroma definiranje problema - kaj je problem, zakaj je problem, kaj so ključne spremenljivke, kakšen je časovni horizont ...
- 2) Formulacija dinamičnih hipotez - kakšne so trenutne teorije problematičnega obnašanja, kateri so notranji in zunanji faktorji, razvoj struktur ...
- 3) Formulacija simulacijskega modela - specifikacija struktur, odločitvenih pravil, ovrednotenje parametrov ...
- 4) Testiranje - primerjava z referenčnimi modeli, robustnost, ekstremni pogoji, občutljivost ...
- 5) Določitev in vrednotenje strategij - specifikacija scenarijev, določitev strategij, kaj če ... analize, občutljivostna analiza ...

Prednosti simulacijskega modeliranja so naslednje:

- možno je analizirati probleme, ki jih ne moremo matematično modelirati,
- reševati je mogoče raznovrstne probleme,
- lahko kontroliramo pogoje eksperimentiranja,
- vrednotenje in analiziranje sistema je močno olajšano s pomočjo raznih animacij delovanja modela.

Med pomanjkljivosti simulacijskega modeliranja lahko štejemo:

- mnogokrat je razvoj modela dolgotrajen in drag,
- simulacije je potrebno večkrat ponavljati, kar prav tako vzame precej časa,
- ne pridobimo zakonitosti, ki veljajo med vhodnimi in izhodnimi veličinami in ne dobimo optimalne rešitve,
- potrebno je poznati več različnih metod in orodij za simuliranje,
- vrednotenje modela je precej kompleksno.

## 2.3 Vrednotenje in testiranje simulacijskih modelov

Nekateri sicer ne zaupajo simulacijskim modelom, vendar pa obstaja kar nekaj testov, ki nam omogočijo določiti vrednost in uporabnost modelov. Z njimi definiramo vrednost modela, njegov namen in pa zaupanje v njega. Teste lahko razdelimo po naslednjih področjih (Schreckengost, 1985, str. 2):

- testi strukture modela,
- testi obnašanja modela,
- ostali testi modela.

## Testi strukture modela

Ker je struktura modela osnova za obnašanje modela, je treba najprej preveriti strukturo. Vsak del modela naj ima svoj pripadajoči del v realnem sistemu in vsak pomemben faktor v realnem sistemu se naj odraža v modelu. Osnovni testi strukture so:

Testiranje parametrov modela - to je lahko v mnogih primerih problem, saj za mnoge probleme s področja organizacijskih in družbenih sistemov sploh nimamo podatkov ali pa niso urejeni in podobno.

Testiranje primernosti mej sistema - tudi tu je precej odvisno od namena, za kateri je prirejen model (npr. ljudje v mestu kupujejo druge produkte kot tisti na vasi, enako tudi prebivalcih dveh različnih držav), zgodi se nam lahko, da bomo morali meje modela razširiti ali pa pomanjšati in bodo rezultati povsem drugačni.

Testiranje ekstremnih pogojev - preveriti je treba meje modela, posebej če želimo nek model sistema prenesti na drugega, ki ima na videz iste karakteristike, hkrati pa nam tak test lahko pokaže določene nepravilnosti v strukturi modela.

## Testi obnašanja modela

S temi testi predvsem primerjamo rezultate, ki jih da model, z rezultati dejanskega sistema. Med te teste spadajo:

Test nepravilnosti obnašanja modela - ko model daje rezultate, ki niso v skladu z rezultati dejanskega sistema, lahko sklepamo, da smo pri konstruiranju modela naredili napako. Lahko smo kaj prezrli, nepravilno določili kakšen parameter ali pa vstavili nepravilno vrednost.

Občutljivostni test - v tem primeru vnašamo na vходу vrednosti, ki odstopajo za manjše vrednosti. V kolikor so odstopanja nesorazmerno velika glede na pričakovane rezultate, lahko sklepamo na nepravilnosti v modelu.

Sorodnostni test - če hočemo pridobiti zaupanje v model, mora dajati rezultate v skladu s sorodnimi modeli, v obratnem primeru lahko sklepamo na napake.

## Ostali testi

V sklopu teh testov testiramo model predvsem na spremembe politik vodenja sistema. Preverjamo ali se sprememba politike vodenja realnega sistema enako odraža tudi pri spremembi politike vodenja simulacijskega modela. Na ta način lahko preverimo model šele po tem, ko je bil ta sistem že mnogokrat izvajan v praksi.

### 3 Osnove sistemske dinamike

Sistemska dinamika se je razvila v šestdesetih letih 20. stoletja. Vpeljal jo je Jay W. Forrester na MIT Sloan School of Management (Forrester, 1973 in 1976). Sprva se je imenovala industrijska dinamika, saj je obravnavala predvsem probleme managementa v industriji.

Kompleksni sistemi so struktura povratnih zank. Ta struktura obkroža vse odločitve, tako javne kot zasebne, tako usklajene kot neusklajene. Ta struktura vpliva tako na organizacijske, kot naravne sisteme, tako na mentalne, kot na fizične sisteme (Forrester, 1973, str. 107).

Kasneje se razvijejo aplikacije tudi na drugih področjih. Nastane kot orodje za preučevanje problemov, ki so prezapleteni za obravnavanje z matematičnimi modeli (diferencialnimi enačbami), saj so bodisi enačbe prezahtevne za uporabnike (management, ki upravlja z dejanskimi sistemi), bodisi vsebujejo preveč neznank. Na področju poslovanja in ekonomije se začne širše uporabljati pri problemih iz proizvodnje, trženja in distribucije, razvoja, managementa in drugih takoj, ko so se začela razvijati primerna računalniška orodja (Roberts, 1981, str. 5). Pogosto se uporablja tudi na področju okoljevarstva in trajnostnega razvoja, kjer preučuje omejenost virov na našem planetu ter vplive človeških dejavnosti na okolje (Meadows in ostali, 2004, str. 129). Poleg prednosti analiziranja sistemov in načrtovanja odločitev ima velik vpliv tudi pri izobraževanju managementa o strukturah, ki delujejo v sistemih, tako proizvodnih kot socialnih. To pa omogoča upravljavcem načrtovanje sistemov in ne le njihovo operativno vodenje (Forrester, 1998, str. 7). Razviti so že številni modeli, ki so namenjeni pomoči upravljavcem pri njihovih odločitvah (Coyle, 1996) in pa številni drugi na najrazličnejših področjih uporabe (Sterman, 2000).

Za vse dinamične sisteme je značilno, da njihova dinamična kompleksnost nastaja predvsem iz naslednjih vzrokov (Sterman, 2003, str. 6):

- **konstantne spremembe** - kar je navidez nespremenljivo, se vedno izkaže, da se skozi daljše časovno obdobje spreminja,
- **tesna povezanost** - akterji v sistemu delujejo tesno med seboj in prav tako tesno z zunanjim svetom, vse je povezano z vsem drugim,
- **vpliv povratnih zank** - zaradi tesne povezanosti vsa dejanja vplivajo na druge osebe, organizacije in naravo, vse strukture prizadete zaradi naših dejanj prav tako reagirajo in nastajajo nove odločitve, na osnovi katerih nastajajo nova stanja, ki zopet vplivajo na naše odločitve,
- **nelinearnost** - posledice so le redko linearno odvisne od vzrokov,
- **odvisnost od preteklosti** - učinki, ki nastanejo zaradi posameznih dejanj, določajo smer naslednjih dejanj, mnogokrat so procesi nepovratni ali pa je potrebno precej več časa, da se izničijo nekatere posledice kot pa nastanejo (in obratno),
- **samoorganiziranost** - sistemi dostikrat delujejo po svojih vzorcih, ki izhajajo iz notranjih struktur in je vplivanje na njih zelo težko ali nemogoče,
- **prilagoditve** - sposobnosti in odločitvena pravila agentov v sistemu se s časom spreminjajo, ljudje se učijo iz izkušenj in temu prilagajajo svoje obnašanje in delovanje,
- **odzivi na spremembe** - dolgoročni odzivi v sistemu so dostikrat drugačni od kratkoročnih, kratkoročnim pozitivnim spremembam dostikrat sledi poslabšanje in obratno,

- **napake v predvidevanjih** - med vzroki in posledicami je mnogokrat velik časovni zamik, zato dostikrat le blažimo simptome ne da bi odpravljali vzroke,
- **odpor na spremembe** - kompleksnost sistema, v katerega smo vključeni, dostikrat presega naše sposobnosti, da ga razumemo, zato velikokrat na prvi pogled očitne rešitve propadejo ali celo povečajo problem.

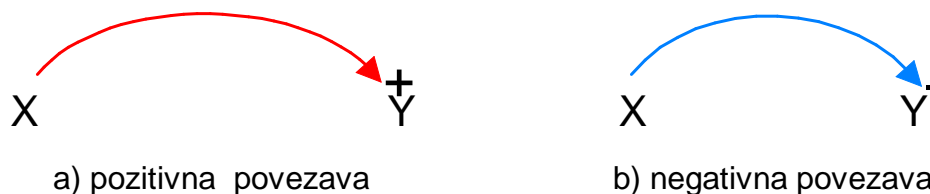
### 3.1 Diagrami vpliva

Osnovni koncept sistemske dinamike so diagrami vpliva povratnih zank. Diagrami vpliva imajo prednosti predvsem v (Sterman, 2000, str. 137):

- hitrem zajemanju hipotez o vzrokih dinamike,
- izvajanju in zajemanju mentalnih modelov iz posameznikov in skupin,
- razpravljanju o vplivih, za katere verjamemo, da so pomembni za problem.

Spremenljivke povežemo s povezavami, ki jih označimo s puščico in jim dodamo predznak, bodisi pozitiven bodisi negativen. Pozitiven predznak povečuje spremembo vrednosti, negativen pa spremembo vrednosti izravnava. Primer pozitivnega in negativnega predznaka vpliva je prikazan na sliki 1.

Slika1: Razmerje med vzrokom in posledico



Vir: Sterman (2000)

Na sliki 1 je prikazan primer, kako nakažemo razmerje med vzrokom in posledico. Vzrok je v tem primeru X, neka posledica, ki zaradi tega nastane, pa je Y. Imamo dva možna primera, pozitivna povezava ali pa negativna povezava.

To pa pomeni naslednje:

- a) **pozitivna povezava** pomeni, če se vrednost vzroka (X) poveča, potem se poveča tudi vrednost posledice (Y) za več, kot bi se povečala drugače in če se vrednost vzroka (X) pomanjša, potem se pomanjša tudi vrednost posledice (Y) za več, kot bi se pomanjšala drugače, ob predpostavki, da vse ostalo ostane nespremenjeno. V primeru akumuliranja se X prišteva k Y.

Primeri so lahko naslednji:

kvaliteta  $\longrightarrow$  + prodaja

rojstva  $\longrightarrow$  + populacija

- b) negativna povezava pa pomeni, če se vrednost vzroka (X) poveča, potem se pomanjša vrednost posledice (Y) za več, kot bi se pomanjšala drugače in če se vrednost vzroka (X) pomanjša, potem se poveča vrednost posledice (Y) za več, kot bi se povečala drugače, ob predpostavki, da vse ostalo ostane nespremenjeno. V primeru akumuliranja pa se X odšteva od Y.

Primeri so lahko naslednji:

cena  $\longrightarrow$  - prodaja

smrti  $\longrightarrow$  - populacija

### 3.2 Strukture in obnašanje dinamičnih sistemov

Glede na kompleksnost in različnost sistemov v našem okolju bi pričakovali mnoge različne oblike obnašanja dinamičnih sistemov. Vendar večina dinamičnih sistemov pozna le majhno število vzorcev obnašanja. Osnovne oblike obnašanja dinamičnih sistemov so (Sterman, 2000, str. 108):

- eksponentna rast,
- zasledovanje cilja,
- oscilacije.

Poleg navedenih pa so pomembnejše izpeljane oblike obnašanja še:

- S-rast (krivulja v obliki črke S),
- S-rast s presežkom in oscilacije,
- presežek in kolaps.

Eksponentna rast izhaja iz pozitivne povratne zanke, zasledovanje cilja izhaja iz negativne povratne zanke, oscilacije pa izhajajo iz negativne povratne zanke, ki vključuje časovne zamike. Izpeljane oblike izhajajo iz nelinearnih interakcij med osnovnimi strukturami povratnih zank.

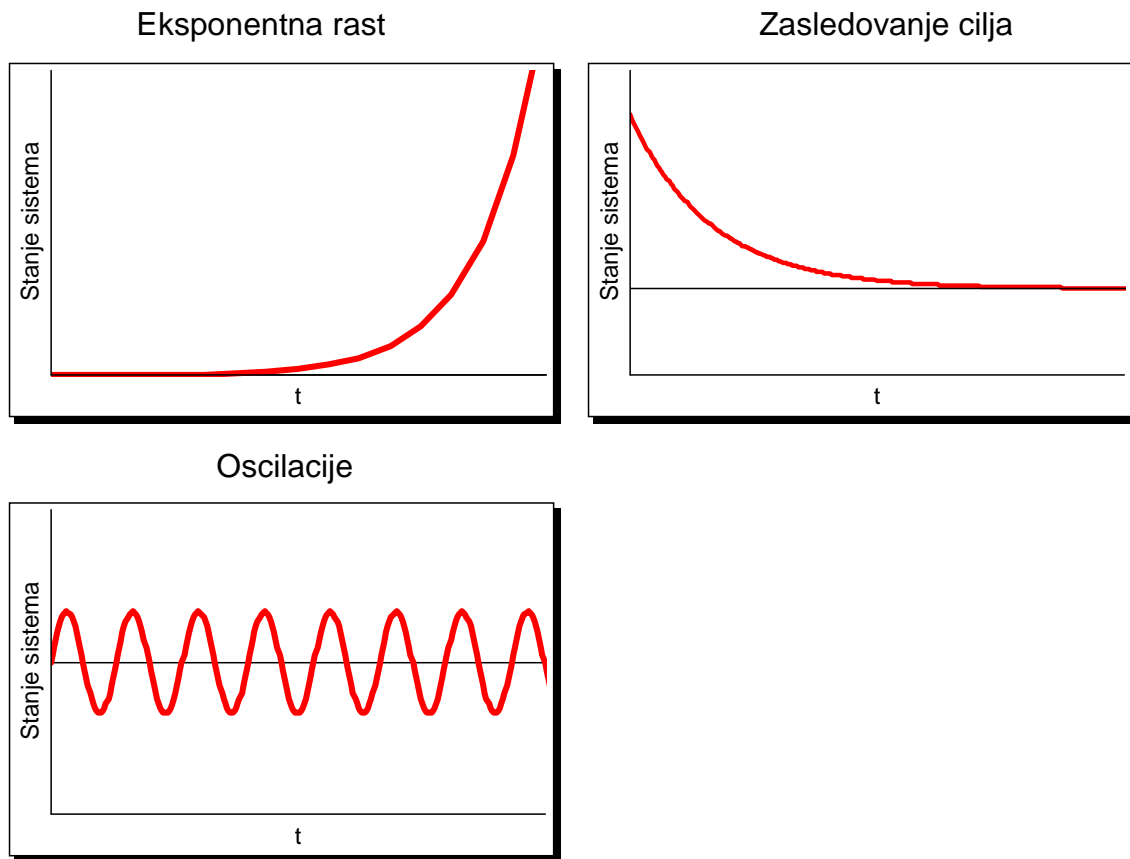
Poznavanje krivulj obnašanja sistema nam na hiter način poda znanje o tem, katere povratne zanke imajo odločilen vpliv v določenem delovanju sistema.



### 3.2.1 Osnovne oblike obnašanja dinamičnih sistemov

Slika 2 prikazuje osnovne oblike obnašanja dinamičnih sistemov.

Slika 2: Osnovne oblike obnašanja dinamičnih sistemov



Vir: Sterman (2000)

#### **Eksponentna rast**

Stopnja rasti je odvisna od stanja sistema, večje je stanje sistema, večja je rast. Najpomembnejša značilnost eksponentne rasti je, da je pri čisti eksponentni rasti čas, v katerem se stanje sistema podvoji, konstanten. To pomeni, da se stanje sistema v istem času, ko se poveča iz ene enote v dve, poveča iz milijona enot v dva milijona enot. Najznačilnejši primer je rast populacije in rast obresti. Večja je populacija, večja bo rast populacije. Enako velja v primeru investiranja. Večjo vsoto vložimo, večji bo prihodek od obresti.

#### **Zasledovanje cilja**

V tem primeru nastopa negativna povratna zanka. Stanje sistema iz ravnotežja vrže neka motnja ali odstopanje. Sistem želimo imeti v nekem stanju, ki ga lahko imenujemo cilj sistema ali zeleno stanje. To zeleno stanje povzroča korekcijo, ki poskuša spraviti sistem nazaj v zeleno stanje. V nekaterih primerih se ti procesi dogajajo kontrolirano, v nekaterih primerih pa ti procesi delujejo avtomatsko. Stopnja, po kateri se približujemo cilju, se v večini primerov počasi manjša, ko se

manjša odstopanje. Redko se dogaja, da je stopnja približevanja konstantna in v trenutku, ko stanje sistema doseže željeno, izgine.

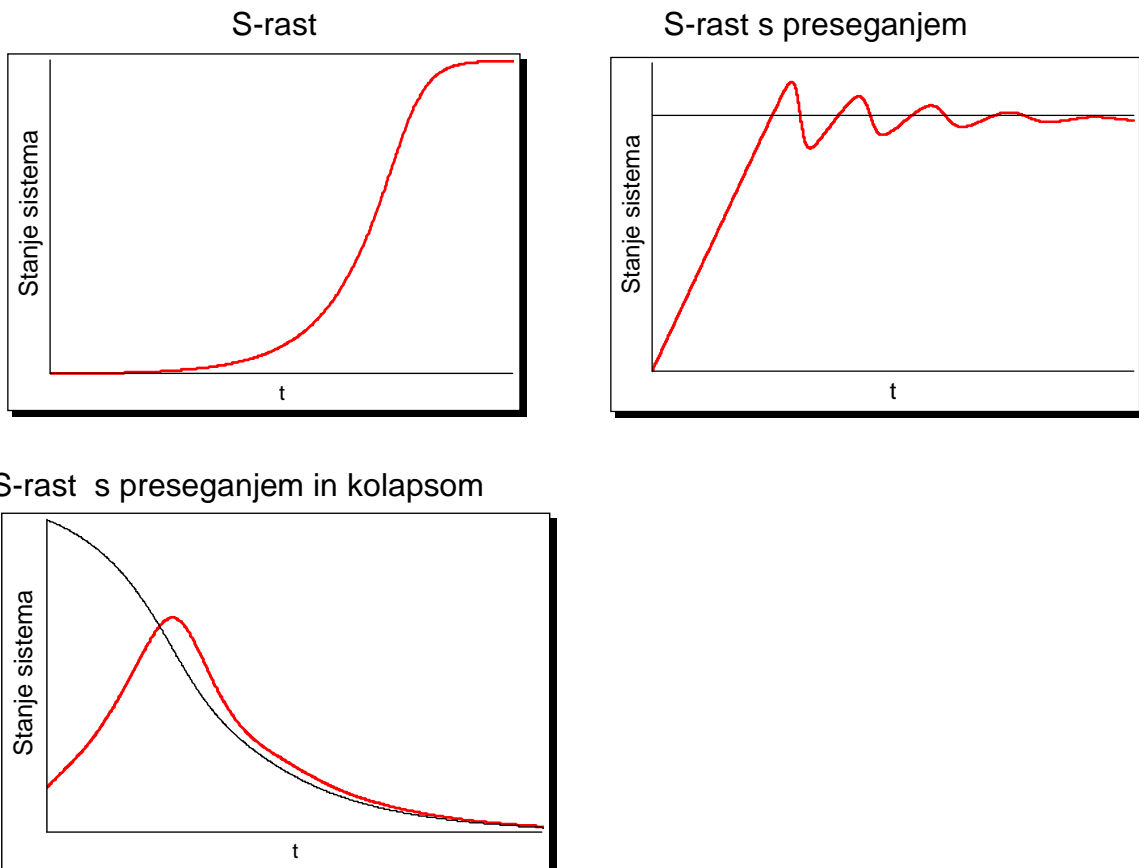
### **Oscilacije**

Oscilacije nastajajo zaradi vpliva negativne povratne zanke, pri kateri so prisotni časovni zamiki. Sistem ves čas presega svoje cilje, v naslednji fazi pa zaostaja za njimi. Proces se ves čas ponavlja in sistem oscilira okoli svojega cilja. Časovni zamiki lahko nastanejo zaradi procesov meritev, poročil in podobnih postopkov. Zaradi tega šele po določenem času ugotovimo odstopanja od želenega stanja. Ko je odstopanje zaznano, sledijo administrativni ukrepi in odločitveni procesi. Zaradi tega nastane zopet nov časovni zamik še preden nastopi odločitev za korekcijo. Potem sledi naslednji časovni zamik, ki nastane, ker je potreben določen čas tudi za izvajanje ukrepov.

### **3.2.2 Izpeljane oblike obnašanja dinamičnih sistemov**

Iz osnovnih oblik obnašanja sistemov sledijo še izpeljane oblike, ki so prikazane na sliki 3.

Slika 3: Izpeljane oblike obnašanja dinamičnih sistemov



Vir: Sterman (2000)

### **S-rast**

V realnosti nobena vrednost ne raste (pada) večno. Zato je zelo pogost način obnašanja sistemov S-rast. Vrednost najprej raste eksponentno, potem se rast počasi ustavlja, dokler ne doseže sistem ravnotežnega stanja. Za razumevanje je zelo koristen koncept nosilne kapacitete, ki se uporablja v ekologiji. Vsako okolje lahko prenese le določeno število organizmov, potem pa nastopijo omejitve v virih za preživetje. Zato je rast najprej eksponentna, ko je v okolju še dovolj virov glede na število populacije. Ko populacija raste, postajajo tudi viri vedno manj dostopni, zato se upočasnjuje rast populacije, dokler ne doseže nekega ravnotežnega stanja primerne virom v tem okolju. Enako velja za rast podjetij na trgu. V začetni fazi je rast hitra, potem pa se začne rast po določenem času upočasnjevati, ko se podjetje začne približevati omejitvam na določenem trgu.

S-rast kaže, da v sistemu najprej prevladujejo pozitivne povratne zanke, ki pospešujejo rast, s časom pa ravno zaradi rasti začnejo prevladovati negativne povratne zanke, ki se rasti upirajo.

S-rast v sistemu nastopa le, če sta izpolnjena dva bistvena pogoja:

- v sistemu ne sme biti pomembnejših časovnih zamikov,
- nosilna kapaciteta mora biti konstantna.

Če ta dva pogoja nista izpolnjena, krivulja preide v drugi dve omenjeni izpeljani obliki.

### **S-rast s preseganjem**

Ta krivulja nastane, če obstajajo v negativni povratni zanki pomembni zamiki. V tem primeru sistem preseže nosilno kapaciteto. Po določenem časovnem zamiku sistem pade pod vrednost nosilne kapacitete, nato spet zraste in oscilira okoli nje.

### **Preseganje in kolaps**

Do tega pojava pride v primerih, ko sistem iz različnih razlogov uniči svoje vire iz okolja. Takrat nosilna kapaciteta drastično pade, kar povzroči močno negativno povratno zanko in posledično sistem kolapsira. Obstajajo številni primeri v naravi, hkrati pa tudi številni primeri podjetij oziroma organizacij, pri katerih je po začetni rasti (celo izjemno hitri), sledil padec in propad iz različnih razlogov.

## **3.3 Pomen nivojev in pretokov v sistemski dinamiki**

Diagrami vpliva so koristni predvsem za zajem mentalnega modela o sistemu in za nazoren prikaz vplivov posameznih povratnih zank. Njihova pomanjkljivost pa je v tem, da ne zajamejo pretokov in nivojev, ki so bistveno orodje za razumevanje dogajanja v sistemu.

Nivoji in pretoki predstavljajo poleg sistema povratnih zvez bistven koncept v teoriji systemske dinamike. Slika 4 prikazuje grafični zapis nivojev in pretokov.

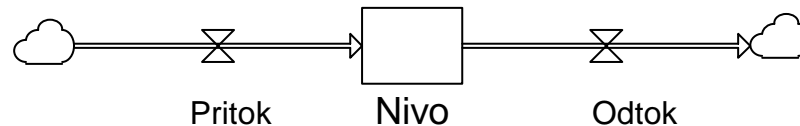
Nivo označujemo s pravokotnikom in simbolizira zaboj ali kontejner, v katerem imamo določen nivo.

Pritoki so predstavljeni s puščicami usmerjenimi v pravokotnik, ki predstavlja nivo. Odtoki so predstavljeni s puščicami usmerjenimi stran od pravokotnika, ki predstavlja nivo.

Ventili predstavljajo regulacijo pritoka in odtoka.

Oblački predstavljajo izvore in ponore, ki so zunaj meja sistema. Predpostavlja se, da imajo neomejeno kapaciteto in ne morejo ovirati pretokov, ki so usmerjeni v oblaček ali ven iz njega.

Slika 4: Prikaz strukture nivojev in pretokov



Vir: Sterman (2000)

Za lažje razumevanje si lahko predstavljamo nivoje in pretoke s hidravlično metaforo (Sterman, 2000, str.193). Nivo je kad, v kateri je tekočina, tekočina na eni strani priteka v kad, to je pritok, na drugi strani pa iz kadi odteka, kar predstavlja odtok. Pritok in odtok sta omejena z ventili.

Razmerja med pretoki in nivoji natančno opišemo z naslednjim izrazom:

$$S(t) = \int_{t_0}^t [I(s) - O(s)] ds + S(t_0) \quad (2)$$

Kjer je:

S - nivo (level),

I - pritok (inflow), ki je odvisen od nivoja oziroma zaloge ter ostalih spremenljivk in parametrov, ki so vključeni v sistem,

O - odtok (outflow), ki je prav tako odvisen od nivoja oziroma zaloge ter ostalih parametrov, ki so vključeni v sistem,

t - čas,

$t_0$  - začetni čas.

Enačba (2) nam poda vrednost nivoja glede na prитоke in odtoke v poljubnem času t. To lahko izrazimo tudi z diferencialno enačbo:

$$d(S)/dt = I(t) - O(t) \quad (3)$$

Enačbi (2) in (3), ki opisujeta nivoje in pretoke, sta enačbi, ki se uporabljata pri modelu zalog. V tem primeru S predstavlja zalogo, I predstavlja rast zalog (proizvodnja), O pa padanje zalog (pošiljke). Na takšen način modeliramo dogajanje v voznem parku, kjer je na primer nivo število vozil v okvari, stopnja okvar vozil je pritok v ta nivo, število opravljenih tedenskih popravil pa je odtok iz tega nivoja. Podobno je pri upravljanju s človeškimi viri, število novincev je predstavljeno kot nivo, pritok v nivo je stopnja zaposlovanja, odtoka iz nivoja pa sta stopnja odpovedi novincev in pa stopnja uvajanja, po kateri novinci prehajajo v nivo, ki predstavlja izkušene vzdrževalce.




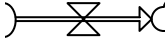
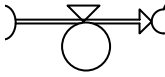




### 3.4 Računalniška orodja za izgradnjo modelov

Računalniška orodja omogočajo učinkovito izgradnjo modelov in izvajanje različnih simulacij. Najbolj priporočljiva orodja za razvijanje simulacij po načelih sistemske dinamike so (MIT OpenCourseWare, System Dynamics for Business Policy):

- iThink,
- Powersim,
- Vensim.

Vsa orodja delujejo na podoben način in omogočajo široko paleto izgradnje modelov. Simulator za analiziranje strategij vzdrževanja vozil zgradimo s programom Powersim. Osnovni gradniki, s katerimi gradimo model po načelu izgradnje diagrama vplivov, so nivoji, pretoki, spremenljivke, konstante in povezave med elementi. Prikazani so v tabeli 1.

Tabela 1: Osnovni gradniki za izgradnjo modelov v Powersimu

Simbol	Ime	Opis
	Nivo	Tip spremenljivke, ki akumulira spremembe na osnovi spremembe pretokov.
	Spremenljivka	Tip spremenljivke, katere vrednost temelji na vrednostih ostalih parametrov v modelu.
	Konstanta	Tip spremenljivke, ki vsebuje fiksno vrednost in vpliva na ostale spremenljivke ter pretoke.
	Pretok	Vpliva na nivoje.
	Pretok s stopnjo	Pretok je odvisen od stopnje.
	Povezava	Poda informacijo spremenljivkam o drugih spremenljivkah.
	Povezava s časovnim zamikom	Uporablja se, ko spremenljivka, ki vpliva na drugo spremenljivko, vsebuje funkcijo časovnega zamika.
	Inicializacijska povezava	Spremenljivki poda začetne vrednosti o drugi spremenljivki.
	Oblak	Nedefiniran izvor ali ponor pretokov, pove nam, da smo na zunanji strani meje modela.

Vir : Powersim Constructor Help

Tabela 1 prikazuje osnovne gradnike v programu Powersim. Omogočajo nam gradnjo modelov po osnovnih načelih sistemske dinamike, torej po načelu diagrama vplivov in po načelu nivojev in pretokov.

Pri delu imamo več možnosti. Uporabimo lahko uporabniški vmesnik, ki omogoča izvajanje simulacij brez vpogleda v model, po drugi strani pa je možna poglobljena analiza posameznih elementov modela. Način dela je prilagojen znanju uporabnika. Pri analizi modela imamo prav tako dve možnosti. Model lahko analiziramo skozi diagram vplivov ali pa v pogledu, ki prikazuje enačbe.

## 4 Pregled možnih strategij vzdrževanja opreme in vozil

V večini sistemov je izjemno pomembno, da se izognemo izpadom in okvaram med delovanjem, saj je to lahko zelo nevarno ali celo katastrofalno za sistem. V ta namen je potrebno vzdrževati opremo. Vzdrževanje predstavlja vse tiste aktivnosti, ki ohranjajo vire in opremo v dobrem delovnem stanju ter opravljajo potrebna popravila, ko se pojavijo okvare, tako da lahko sistem deluje kot je bilo zamišljeno (Stevenson, 1993, str.768).

Da bi se izognili napakam in izboljšali razpoložljivost in zanesljivost sistemov, so bile razvite številne politike vzdrževanja, ki so imele osnovo v različnih analizah in predpostavkah. Te politike lahko razdelimo na vzdrževanje na osnovi starosti opreme, politike periodičnih zamenjav, politike omejevanja stroškov popravil, politike omejevanja časa popravil, politike časovno planiranih preventivnih vzdrževanj in politike omejevanja okvar (Wang, 2002, str. 471).

Cilj vzdrževanja je v zmanjševanju prekinitev procesov proizvodnje, tako v kvalitativnem kot v časovnem smislu. Vzdrževanje pa lahko prinese slabši finančni rezultat, saj lahko stroški večje zanesljivosti sistema presežejo koristi, ki jih z večjo zanesljivostjo pridobimo. Zato je upravljanje vzdrževanja definirano kot upravljanje z vsemi sredstvi, ki so last podjetja s ciljem maksimiziranja povračila investicij v ta sredstva (Wireman, 1998, str. 1). Tako je cilj upravljanja vzdrževanja v zmanjšanju negativnih učinkov okvar in maksimiziranju razpoložljivosti sredstev ob minimalnih stroških (Lofsten, 1999, str. 716). Cilj vzdrževalnih programov pa lahko definiramo tudi kot ohranjanje funkcioniranja sistema na stroškovno učinkovit način (Tsang, 1995, str. 3).

### 4.1 Razvoj strategij vzdrževanja

Ko gledamo na vzdrževanje v strateškem smislu, so bistvene štiri dimenzije problema vzdrževanja (Tsang, 2002, str.7):

- možnosti izvajanja servisiranja opreme,
- organizacijska in delovna struktura,
- metodologija vzdrževanja in sistem podpore,
- človeški viri in pretok informacij.

Strategija vzdrževanja mora imeti cilj v tem, da izvajamo čim manj vzdrževanj in čim redkeje, a obenem zadržimo razpoložljivost opreme (Horner in ostali, 1997, str. 273).

Kot je bilo omenjeno že v uvodu, je razvoj strategij in politik vzdrževanja dal naslednje načine vzdrževanja opreme:

- vzdrževanje oz. popravila ob okvari,
- preventivno vzdrževanje,
- pogojno vzdrževanje - CBM (conditioned based maintenance).

Za uspešno vzdrževanje je potrebno poiskati primerno razmerje med temi tremi osnovnimi strategijami vzdrževanja.

Ob teh treh osnovnih strategijah je potrebno omeniti še metodo TPM - total productivity maintenance (popolno vzdrževanje proizvodnih sredstev), ki celovito obravnava problematiko vzdrževanja.

#### 4.1.1 Popravila okvar

Ta pogled na vzdrževanje je najstarejši. Predvideva izvajanje posegov na opremi le takrat, ko se oprema pokvari. Izvira iz začetnih časov industrializacije, ko je bila tehnologija še nerazvita in so bili zaradi tega tudi stroški popravil nizki, popravila pa so lahko bila izvedena v relativno kratkem času. Takšen način vzdrževanja seveda ne rabi nobenega načrtovanja in planiranja. Ko se okvara zgodi, se popravi in proizvodni proces teče dalje.

Takšno izvajanje vzdrževanja je v današnjem času za večino sistemov že neprimerno. Danes so stroji tehnološko že izjemno zahtevni za obvladovanje, zato so potrebna posebna znanja in spretnosti vzdrževalcev, hkrati pa je potrebno veliko več časa za popravilo okvar. Zaradi tega nenačrtovane prekinitve proizvodnje ali storitev trajajo daljši čas, kar negativno vpliva med drugim tako na zadovoljstvo strank kot moralo zaposlenih.

Hkrati ima takšen način vzdrževanja opreme še eno negativno posledico. Ob popravih ob okvarah je izjemno težko načrtovati človeške vire in zaloge rezervnih delov (Horner in ostali, 1997, str. 275).

Upoštevati pa je potrebno tudi, da okvare posameznih delov lahko posledično vodijo tudi do okvar drugih delov v sistemu (Peres in ostali, 2003, str. 130).

#### 4.1.2 Preventivno vzdrževanje

Preventivno vzdrževanje se razvije zaradi slabosti, ki so naštetje v prejšnjem poglavju o popravih le ob okvarah. Preventivno vzdrževanje se izvaja na podlagi rednih posegov, ki so določeni na osnovi operativnih ur ali pa starosti vozil ali opreme oziroma delovnih sredstev na splošno. Zasnovano je na predpostavki, da je možno določiti povprečno življenjsko dobo posameznih elementov. Zaradi tega je možno ob preventivnem vzdrževanju zmanjšati število okvar.

Glavni prednosti preventivnega vzdrževanja sta (Matulionis, 1991, str. 16):

- vzdrževanje se lahko načrtuje in izvaja takrat, ko je bolj primerno glede na proizvodnjo, potrebe strank in razpoložljive človeške vire,
- v splošnem zagotavlja nižjo stopnjo odpovedi, kar posledično manjša stroške okvar in stroške izpadov dejavnosti.

Hkrati pa ima preventivno vzdrževanje tudi določene slabosti, ki lahko izničijo zgoraj omenjene prednosti (Chan in ostali, 1997, str. 117):

- elementi opreme se odstranijo v predvidenih intervalih ne glede na njihovo stanje v tem trenutku, kar lahko vodi v izgube virov, saj je možno, da so ti elementi še uporabni za varno in zanesljivo delovanje,
- zamenjava elementa z novim lahko vodi v okvare zaradi neuskkljenosti novega elementa s sistemom,

- čeprav preventivno vzdrževanje zahteva precejšnje število zaloge rezervnih delov in človeških virov, ne uspe popolnoma preprečiti okvar.

#### 4.1.3 CBM (pogojno vzdrževanje)

Pogojno vzdrževanje se razvije, da bi odpravilo slabosti, ki so se pokazale pri delovanju preventivnega vzdrževanja v praksi. Cilj je zamenjati posamezne elemente točno v tistem trenutku, ko je ta zamenjava resnično potrebna. Torej ne prepozno in ne prezgodaj.

Vzdrževanje se izvaja kot odgovor na spremembe v posameznem elementu, ugotovljene na podlagi sprememb opazovanih parametrov, ki določajo stanje in delovanje posamezne enote (Kelly, 1983, str.8).

Takšno vzdrževanje je možno le, če se stanje elementov sistema konstantno preverja. To se lahko izvaja na način, da namestimo v sistem številne senzorje, ki preverjajo in spremljajo delovanje elementov ter opozorijo na posamezne spremembe v delovanju, kot so različne vibracije, spremembe temperatur in podobno. To posledično omogoča reakcijo v optimalnem trenutku tik preden se element okvari.

Tudi ta način vzdrževanja ima svoje slabosti:

- zahteva velike količine časa, virov, energije, hkrati pa ni vedno učinkovito v smislu stroškov, saj lahko stroški opreme za monitoring presežejo koristi, ki nam jih tak način vzdrževanja prinese,
- za določene komponente je tak način zelo ustrezen (dajejo nedvoumne znake, da bo prišlo do okvare), za druge pa je tak način neustrezen, predvsem ga je težko aplicirati na sistemih, ki so mobilni, kot recimo vozila na tirih (Bengtsson, 2003),
- za opazovanje nekaterih elementov primerna oprema še ne obstaja.

#### 4.1.4 Določitev primerne strategije

Za določitev primerne strategije je potrebno vedeti, da je cilj upravljanja vzdrževanja povečanje razpoložljivosti opreme ob minimalnih možnih stroških.

Literatura poudarja, da vsaka vzdrževalna intervencija, ki je opravljena prehitro ali prepozno glede na optimalen čas, poveča stroške vzdrževanja (Lofsten, 2000, str. 47). Tako vsako povečanje vzdrževanja poveča stroške vzdrževanja, obenem pa tudi opuščanje vzdrževanja vodi v večje verjetnosti okvar in posledično večje stroške popravil in hkrati tudi večje stroške zaradi izpadov proizvodnje. Tako so najpomembnejši dejavniki, ki jih upoštevamo pri načrtovanju vzdrževalnih aktivnosti, stopnja odpovedi ter stroški povezani s tem, poleg tega pa primernost in praktičnost vzdrževalnih posegov glede na sistem, ki se vzdržuje.

Vzdrževanje po načelu odpravljanja okvar je primerno, ko so posledični stroški okvar nizki, stroški vzdrževalnih posegov visoki in ko se stopnja okvar s časom ne povečuje. Na drugi strani velja za preventivno in pogojno vzdrževanje ravno obratno. Za ti vrsti vzdrževanja se odločamo, ko so stroški okvar visoki in stroški vzdrževalnih posegov nizki. Pogojno vzdrževanje dobi prednost pred



preventivnem, če so stroški za odkrivanje znakov, ki vodijo k okvaram, nizki. Če je možno, se te tri strategije upravljanja vzdrževanja lahko med seboj prepletajo. Za posamezne elemente znotraj sistema se lahko določi njim najprimernejša strategija. Tabela 2 prikazuje prednosti in slabosti posameznih tipov strategij vzdrževanja.

Tabela 2: Prednosti in slabosti vzdrževalnih strategij

Prednosti in slabosti strategij vzdrževanja		
Strategija	<b>prednosti</b>	<b>slabosti</b>
<b>Popravilo ob okvarah - delovanje do okvare</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> ni nevarnosti, da bi preveč vzdrževali</li> <li><input type="checkbox"/> nobenih dodatnih stroškov z monitoringom</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> velika nevarnost sekundarnih odpovedi</li> <li><input type="checkbox"/> velike prekinitve proizvodnje</li> <li><input type="checkbox"/> visoki stroški popravil</li> <li><input type="checkbox"/> nadurno delo</li> <li><input type="checkbox"/> problemi z varnostjo</li> </ul>
<b>Preventivno vzdrževanje - popravi preden se pokvari</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> stroji delujejo zanesljivo</li> <li><input type="checkbox"/> manj katastrofičnih odpovedi</li> <li><input type="checkbox"/> večja kontrola rezervnih delov in stroškov</li> <li><input type="checkbox"/> zmanjšane nepričakovane odpovedi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> popravila tudi takrat, ko včasih ni potrebno</li> <li><input type="checkbox"/> popravilo pogosto prinese neugodne posledice</li> <li><input type="checkbox"/> še vedno so nenačrtovane okvare</li> </ul>
<b>CBM (pogojno vzdrževanje) - če ni pokvarjeno, ne popravlja</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> zmanjšanje nepričakovanih odpovedi</li> <li><input type="checkbox"/> deli se naročajo, ko se jih rabi</li> <li><input type="checkbox"/> vzdrževanje se izvaja ob času, ki je najbolj primeren</li> <li><input type="checkbox"/> podaljša se življenjska doba opreme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> veliki stroški investicije</li> <li><input type="checkbox"/> zahtevana dodatna znanja</li> </ul>

Vir: Bengtsson in ostali, 2004

Zgornja tabela popisuje bistvene prednosti in slabosti posameznih tipov strategij. Upravljalci pa morajo poleg tega upoštevati tudi ne le vidne oziroma merljive stroške, kot so materiali, človeški viri, opravljene delovne ure, ampak tudi nevidne oziroma težje merljive stroške, kot so stroški motenja procesov, nezadovoljstvo strank in tudi nezadovoljstvo delavcev, ki delajo s slabo opremo.

Za načrtovanje vzdrževalnih strategij je potrebno upoštevati vse našteteto. Zaradi kompleksnosti pa je primerno orodje za pomoč pri načrtovanju strategij lahko tudi simulator.

## 4.2 TPM (popolno vzdrževanje proizvodnih sredstev)

To je način upravljanja z vzdrževanjem, ki se trudi vzdrževanje obravnavati celovito in upoštevati vsa pomembna dejstva. Za učinkovito celovito vzdrževanje je ključnih pet elementov (Nakajima, 1988, str. 11):

1. Cilj je maksimizirati učinkovitost opreme.
2. Vzpostaviti je potrebno učinkovit sistem preventivnega vzdrževanja skozi celoten življenjski cikel opreme.
3. Problema se je potrebno lotiti z vključevanjem vseh oddelkov v organizaciji (inženiring, operativa, vzdrževanje, management).
4. Vključiti je potrebno vsakega posameznega zaposlenega.
5. Preventivno vzdrževanje je potrebno promovirati tako skozi vodstvo kot tudi v vsaki enoti posebej.

Znotraj tega koncepta lahko določimo tri najpomembnejše elemente učinkovitosti dejavnosti (Pomorski, 2004, str. 77):

### **Razpoložljivost**

- uspešnost vzdrževanja, ki povzroči, da je oprema razpoložljiva za dejavnosti, ki jih želimo izvajati.

### **Delovanje**

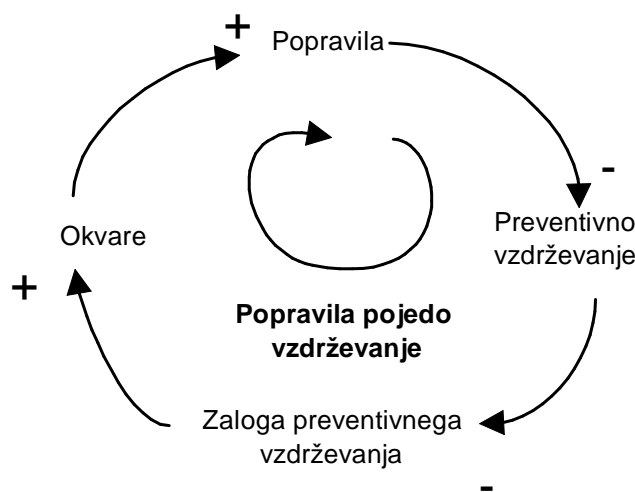
- vzdrževanje mora zagotoviti, da oprema med svojo življenjsko dobo deluje na način, ki daje optimalne učinke.

### **Kvaliteta**

- oprema mora biti usposobljena na način, da so izdelki oziroma storitve v skladu s kvaliteto, ki se zahteva.

Če skozi TPM metodo gledamo na proces vzdrževanja dinamično, vidimo, da metoda popravil ob okvarah sproža le še več okvar. Iz tega sledi povratna zanka, ki povzroča še večje število okvar in zato zmanjka časa za načrtovana preventivna vzdrževanja. Pravimo, da popravila pojedó preventivno vzdrževanje. Proces, ki ga povzroča povratna zanka, je prikazan na sliki 5.

Slika 5: Kritična povratna zanka zaradi vzdrževanja ob okvarah



Vir: Thun (2004)

S slike 5 je razviden diagram vpliva, če dajemo prednost vzdrževanju ob okvarah. Okvare večajo število popravil, število popravil pa negativno vpliva na čas, ki ostane za preventivno vzdrževanje. To bo zmanjšalo zalogo opravljenih preventivnih vzdrževanj. Manj preventivnih vzdrževanj pa vodi k večjemu številu okvar. To pa zopet vodi k še več časa, ki ga porabimo za popravila in zopet k še manj časa za preventivno vzdrževanje. Na tak način smo ujeti v negativno zanko, ki nas vodi v vedno slabšo situacijo glede stanja opreme in stroške vzdrževanja.

Za prekinitev tega cikla se znotraj metode TPM predlaga kar nekaj izboljšav. Enostavna vzdrževalna opravila se preloži na operaterje opreme, kar razbremeni oddelek vzdrževalcev. Hkrati morajo operaterji posvečati večjo pozornost preprečevanju okvar in opozarjanju na možne okvare. Cilj je, da vzdrževalni oddelek ni preobremenjen s popravili, t.i. gašenjem požarov in se lahko v večji meri posveča preventivnim posegom ter izboljšavam na opremi. V sklopu tega je potrebno izvajati in posvečati pozornost predvsem izobraževanju delavcev, za katerega mora biti zadolžen oddelek vzdrževanja.

Tudi pri tem lahko nastanejo negativni učinki. Delavci ne bodo takoj usposobljeni za takšna opravila, zato bo potreben čas in pa tudi nekaj napak v procesu. Na koncu to vendarle privede do pozitivnih učinkov, saj se bodo delavci bolje zavedali delovanja opreme in s tem prav tako pripomogli k boljšemu delovanju celotnega sistema. Druga negativna posledica je, da se bodo delavci počutili preobremenjene. Številne naloge jih bodo motile pri njihovih vsakodnevnih opravilih in rutini, saj se jim bo zdela vsota vsakodnevnega in dodatnega dela prevelika. Poleg tega pa na njih negativno vpliva pritisk na večanje proizvodnje s strani vodstva podjetja. Pritisk na povečanje proizvodnje lahko zaduši preventivno vzdrževanje (Maier, 2000, str. 376).

Positiven učinek sledi tudi iz tega, da ob zmanjšanju okvar in pravilno opravljenih preventivnih posegih ostane oddelku vzdrževanja več časa. Zato se lahko več časa posveti tudi načrtovanju postopkov v sodelovanju z ostalimi oddelki, ki izboljšajo postopke in učinkovitost vzdrževanja. To zopet vodi k zmanjšanju okvar.

Kljub vsemu se različni signali v dinamičnem obnašanju sistema marsikdaj razumejo neustrezno, kar vodi k napačnim odločitvam pri načrtovanju vzdrževanja. Tako so mnogi poskusi izboljšav končali kot neuspešni, kar je iz literature znano kot "paradoks izboljšave" (Sterman in ostali, 1997 in Oliva, 2001), ko začetni spodbudni rezultati na koncu privedejo do rezultatov, ki so še celo na nižjem nivoju, kot so bili pred uvajanjem sprememb. Ob pritisku k povečanju dela na začetku dejanska izvedba raste, vendar se poveča pritisk na delo, zato pa manjši delež časa posvečamo izboljšavam in usposabljanju. Zaradi tega s časom usposobljenost pade, posledično temu pa pade tudi izvedba. V obratnem primeru, ko povečamo pritisk na izboljšave in usposabljanje ter izobraževanje, pa v začetni fazi izvedba pade, saj se manj časa posveča delu. Vendar pa začne usposobljenost s časom rasti, zaradi tega pa začne rasti tudi dejanska izvedba. Na koncu nas druga varianta pripelje v veliko boljši položaj. Vendar so bili začetni signali drugačni, kar nas lahko pripelje do napačnih sklepanj in do omenjenega pojava "paradoksa izboljšave".

### **4.3 Sistemski pristop k upravljanju vzdrževanja**

Ob omenjenem izbiranju med posameznimi strategijami je potrebno upoštevati tudi celotno sliko. Poleg optimizacije razpoložljivosti opreme in nižanja stroškov

vzdrževanja, morajo upravljavci upoštevati tudi vplive na ostale podsisteme podjetja oziroma organizacije. Vzdrževanje je strogo povezano z drugimi funkcijami podjetja, še posebej s (Bivona, 2005, str.5):

- proizvodnjo,
- financami,
- upravljanju s sredstvi.

Predvsem vzdrževanje in proizvodnja sta v stalnem medsebojnem konfliktu (Lofsten, 1999, str. 718). Preventivno vzdrževanje se smatra kot omejitev proizvodnemu procesu. Zato se podjetja odločajo ali za zmanjšanje preventivnih posegov ali pa po drugi strani za povečanje sredstev (večje število vozil), v smislu ohranjanja razpoložljivosti, kar pa povečuje stroške za investiranje. Kar se tiče vpliva financ na vzdrževanje, je pogosta posledica, da se vzdrževanje ne izvaja po dejanskih potrebah, ampak glede na finančno stanje. V želji po večanju proizvodnje se ob pomanjkanju kapitala dostikrat niža proračun za vse, po mnenju uprave, nenujne stroške. Posledično zmanjka sredstev za preventivno vzdrževanje.

Upravljanje z delovnimi sredstvi (v našem primeru vozni park) prav tako močno vpliva na vzdrževanje. Različna povprečna starost opreme, različne tehnološke karakteristike in različni standardi proizvajalcev prav tako vplivajo na zanesljivost, sposobnost vzdrževanja in razpoložljivost. Primer je, ko imajo določena vozila visoko zanesljivost, vendar je čas zakasnitve za rezervne dele lahko dolg, kar pomeni, da bo povprečen čas za popravilo dolg in posledično bo razpoložljivost takšnih vozil majhna (Mulder, 2003, str.6).

Kot pomoč pri odločanju je bil razvit koncept LCC - life cycle cost (stroški v življenjskem ciklu proizvoda). Cilj je pomagati upravljavcem razumeti razmerje med stroški nabave na eni strani ter operativnimi stroški in stroški vzdrževanja na drugi strani v življenjskem ciklu posameznega proizvoda oziroma poiskati pravo razmerje med stroški investicije in operativnimi stroški (Susman, 1989, str. 8). Tudi ta koncept ima določene pomanjkljivosti. Za izgradnjo modela moramo pred nabavo imeti celotno podatkovno bazo stroškov, kar pa je v večini primerov nemogoče. Sicer to lahko priskrbi prodajalec, vendar moramo pričakovati, da njegovi podatki ne bodo povsem realistični. Poleg tega ti modeli ne upoštevajo staranja materiala, stroške, ki nastanejo zaradi izgubljenih priložnosti ob okvarah, stroške zaradi učenja in privajanja na opremo in podobno.

Z vzdrževanjem je prav tako povezana funkcija človeških virov. Potrebno je zagotoviti razpoložljivost opreme znotraj omejitev, ki jo predstavljajo omejeni človeški viri. Tu se pojavljajo vprašanja v zvezi z zaposlovanjem, nadomeščanjem, izobraževanjem, morebitnimi nadurami in podobno. Odločitve, povezane z zaposlovanjem delavcev na programih vzdrževanja, lahko povzročajo različne neustreznosti in oscilacije v izpolnjevanju načrta vzdrževanja. Še posebej, če so bazirane na napačni zaznavi podatkov iz preteklosti. Ko se zaradi dobrega vzdrževanja stopnja okvar zmanjša, zmanjšamo število delavcev namenjenih za vzdrževanje, posledica je ponovno povečanje okvar (Mashayekhi, 1996, str.1).

Razmerja med posameznimi podsistemi, ki jih je potrebno upoštevati ob načrtovanju vzdrževanja, so torej precej zapletena in kompleksna. Zaradi tega pogosto obstaja velik razkorak med cilji vzdrževanja in skupno strategijo organizacije glede na izmerjene učinke sistema (Kutucuoglu in ostali, 2001, str. 173). V glavnem se večina merjenih učinkov nanaša le na operativno perspektivo vzdrževalnih aktivnosti, medtem ko zanemarija učinke na preostale funkcije podjetja.

## 5 Model vzdrževanja vozil

Pri pristopu izgradnje modela se držimo standardnega postopka, ki je opisan v prejšnjih poglavjih. Iz tega sledi, da v začetni fazi izdelamo diagram vplivov, ki bo omogočal vpogled v povezave in vplive med posameznimi elementi sistema, nato pa s pomočjo računalniškega orodja izgradimo model postopoma po posameznih modulih. Te module v naslednji fazi povežemo v celoto. Sledi še izgradnja uporabniških vmesnikov, s pomočjo katerih v fazi izvajanja simulacij ter preizkušanja strategij lahko vztavljamo želene vrednosti, ki nam potem na koncu dajo različne rezultate. Najprej zgradimo model, v katerem je predviden konstanten obseg voznega parka, nato pa ga dopolnimo tako, da lahko analiziramo še reakcije sistema na različne spremembe zunanega povpraševanja.

Pri izgradnji modela sledimo načelu nivojev in pretokov. Zato so v model vključene številne spremenljivke, ki določajo stopnje pritokov in odtokov iz nivojev. Te vrednosti je potrebno predpostaviti. Če določene vrednosti predpostavimo, lahko kdo oporeka točnosti teh predpostavk. Vendar je prednost simulacijskih orodij ravno v tem, da lahko simuliramo sistem in analiziramo posamezne strategije kljub temu da ne poznamo natančno vseh vrednosti parametrov, ki vplivajo na dogajanje v sistemu. Naslednja velika prednost pa je v tem, da v kolikor nekdo meni, da so posamezne predpostavke napačne ali pa ima na razpolago bolj utemeljene podatke, lahko vrednosti teh predpostavk v trenutku zamenjamo in takoj izvedemo naslednje simulacije ter tako sistem preizkusimo v drugačnih pogojih. Najpomembnejše je, da z diagramom vplivov pravilno zajamemo vplive med posameznimi faktorji. Kako močan bo vpliv posameznih faktorjev v prihodnje, pa je seveda težje določiti. Običajno so rezultati modela dosti bolj občutljivi na meje modela, stopnje vplivov in pa definicije odločitvenih procesov, kot pa na spremembe parametrov posameznih spremenljivk (Stermann, 2002, str. 522). Simulacija nam omogoča, da hitro in enostavno preizkusimo vse te vplive in jih analiziramo ter tako izdelamo strategije za različne možnosti, ki se lahko pojavijo. Pri tem si lahko pomagamo tudi z občutljivostno analizo, ki pokaže, kako vplivajo posamezna odstopanja parametrov na obnašanje modela. Občutljivostna analiza se uporablja, da ugotovimo, kako občutljiv je model na spremembe vrednosti parametrov in na spremembe struktur v modelu (Breirova, 1996, str. 47). Zato ima občutljivostna analiza pomembno vlogo tako pri gradnji modela kot pri ocenjevanju obnašanja modela.

Model zgradimo v petih modulih, ki jih nato združimo v celoto. Moduli so uporabni tudi neodvisno. Moduli so naslednji:

### 1. Upravljanje z vozili

Prvi modul je namenjen preučevanju vpliva nabavljanja vozil na stanje voznega parka. Glede na odločitve o dinamiki nabavljanja vozil, se spreminja povprečna starost vozil, kar vpliva na stopnjo okvar. Hkrati lahko spremljamo, kako se spreminja stanje voznega parka glede na izbrane politike vzdrževanja. Spremljamo lahko tudi količine vozil po posameznih razredih in skupno količino vozil.

## **2. Vpliv preventivnega vzdrževanja na okvare**

V tem sklopu določimo predvsem to, kako bo količina preventivnega vzdrževanja vplivala na stopnjo okvar, ki se pojavljajo pri vozilih. Stopnjo okvar modeliramo glede na posamezne razrede oziroma starostne skupine. V tem modulu je modeliran tudi vpliv preventivnega vzdrževanja na stopnjo okvar pri posamezni skupini vozil.

## **3. Upravljanje vzdrževalnih nalog**

Tu definiramo, na kakšen način bo delovala vzdrževalna služba, torej katere naloge bodo prednostne. V praksi je običajno, da je potrebno najprej odpraviti okvare, šele nato pa se lahko vzdrževalci posvetijo nalogam preventivnega vzdrževanja. Razmerja bodo odvisna predvsem od kapacitete vzdrževalcev, ki bodo na razpolago.

## **4. Upravljanje s človeškimi viri**

Določiti je potrebno tudi odločitvena pravila v zvezi z zaposlovanjem in usposabljanjem vzdrževalcev. Temu je posvečen ta modul, kjer določimo, koliko časa je potrebnega za usposabljanje in privajanje novincev, kakšna je njihova kapaciteta oziroma sposobnost v primerjavi z izkušenimi delavci, kakšna je predvidena stopnja zapuščanja podjetja in podobno.

## **5. Spremljanje prihodkov in odhodkov**

Ta del obravnava stroške in prihodke, povezane s strategijami upravljanja. Vse odločitve, ki se sprejmejo, so povezane s stroški, ki vplivajo na manjšanje dobička, nasproti temu so prihodki, ki so odvisni od opravljenih storitev. Opravljene storitve pa so odvisne od razpoložljivosti vozil. Razlika med prihodki in odhodki je dobiček. Cilj je izbrati strategijo, ki prinaša največji možni dobiček, ki je neposredno merilo uspešnosti. Ob tem pa je potrebno spremljati tudi druge kazalce, kot so izkoristek vzdrževalcev, razpoložljivost vozil, stopnja okvar, število vozil v delavnici, povprečna starost vozil in ostale kazalce. Ti kazalci posredno nakazujejo uspešnost sistema in so prav tako zelo pomembni.

Strategije se bodo določale z naslednjih treh vidikov:

- dinamike obnovitve,
- količine preventivnega vzdrževanja,
- dinamike zaposlovanja.

Za ta namen se zgradi uporabniški vmesnik oziroma upravljalni modul, ki omogoča vstavljanje posameznih parametrov v zvezi s sprejetimi odločitvami, obenem pa ob posamezni simulaciji spremljamo diagram, ki podaja krivuljo dobička. Poleg tega naredimo pomožne diagrame, ki spremljajo krivulje ostalih pomembnih vrednosti. Simulator pa vsebuje še pomožne module, kjer lahko spremenimo določene predpostavke, kot je upravljalni modul, kjer nastavimo začetno količino vozil, ki so v voznem parku. Poleg tega pa še modul, kjer lahko

vstavimo cene posameznih aktivnosti in tako preizkušamo rezultate sistema v primerih, ko se spremenijo posamezne stroškovne predpostavke, kot so cena nabavljenih vozil, plače vzdrževalcev, stroški vzdrževalnih posegov (sprememba cen nadomestnih delov) in podobno.

Na koncu model dopolnimo še na način, da je možno preučevati strategije ob variabilnem obsegu voznega parka. Ob spremembah zunanjega povpraševanja je potrebno prilagajati (večati ali manjšati) vozni park, da bo število vozil ustrezalo novim zahtevam. Na voljo imamo različne funkcije, s katerimi lahko določimo takšne spremembe zunanjega povpraševanja. Tem novim stanjem je potrebno prilagajati tudi število vzdrževalcev. V ta namen programiramo odločitvena pravila, ki bodo omogočala takšna prilagajanja.

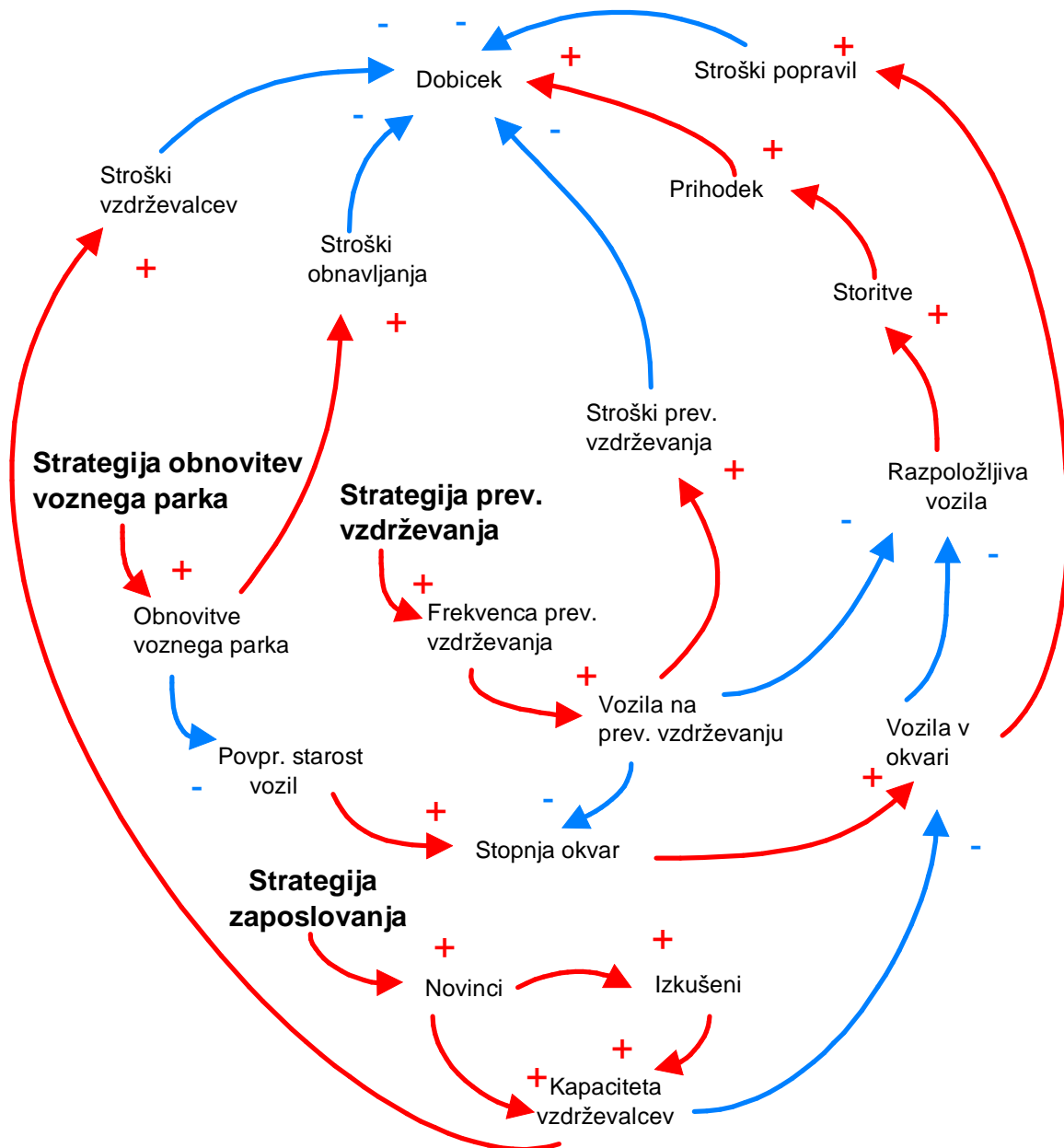
## 5.1 Diagram vplivov v modelu vzdrževanja vozil

Diagram vplivov je pomemben element pri izgradnji simulacijskih modelov. Poda nam hitro sliko o medsebojnih razmerjih v sistemu, ki ga obravnavamo. Poleg tega je pomembnost diagrama vplivov v tem, da lahko na enostaven način tisti, ki gradi model, predstavi njegove zamisli tistemu, ki mu je model namenjen. V večini primerov so to različne osebe. Upravitelji različnih sistemov ponavadi nimajo matematičnih in računalniških znanj, ki bi omogočala izgradnjo kompleksnih modelov za simuliranje delovanja sistema, ki ga vodijo in upravljajo. Morajo pa imeti zaupanje v simulator, ki naj jim pomaga pri odločitvah v zvezi z upravljanjem sistema. Ravno zaradi tega je pomembno, da je diagram vpliva pregleden in da obstaja konsenz med vsemi, ki se ukvarjajo tako z izgradnjo simulatorja in tudi vsemi tistimi, ki ga bodo v končni fazi uporabljali.

V diagramu vpliva so poenostavljeno prikazane predpostavke, ki ponazarjajo delovanje sistema vzdrževanja vozil. Upoštevamo izhodiščni model (Serman, 2000), ki ga prilagodimo posebnostim vozil. Upoštevamo bistveno dejstvo, da uveljavljanje preventivnega vzdrževanja manjša število okvar. Sermanov model in prav tako Thunov prikazujeta predvsem, kako se lahko zastavljeni načrti zaradi različnih vzrokov izjalovijo. Pri našem modelu pa predpostavimo, da so odločitve vsiljene in upravljalec(-ci) ne popuščajo pri svojih odločitvah. To nam omogoča medsebojno primerjanje in preizkušanje posameznih strategij. Hkrati vključimo v model upravljanje s človeškimi viri na podoben način, kot je prisoten pri Varelisovem modelu vzdrževanja letalskih motorjev. V tem modelu so nekatere predpostavke neprimerne za vzdrževanje cestnih vozil, zato jih ne upoštevamo (deponiranje motorjev, menjavanje motorjev v vozilih, razpolaganje z rezervnimi motorji). Poleg tega, za razliko od tega modela, poenostavimo upravljanje z rezervnimi deli in to pozneje v posameznih modulih upoštevamo v povprečnem času popravila. Glede na Bivonin model vzdrževanja v avtobusnih podjetjih je razlika v tem, da je v njegovem modelu vključena tudi možnost vzdrževanja z zunanjimi vzdrževalci. Model vključuje tudi vrednost vozil in odvisnost nabavljanja od dobička podjetja. V našem modelu pa se vrednost vozil kaže skozi pojavljanje okvar in je pojavljanje okvar odvisno od starosti in pa nabavne cene vozil. Poenostavljen diagram vplivov v modelu za vzdrževanje vozil je predstavljen na sliki 6. Podrobnosti pa so obdelane v posameznih modulih.

Na diagramu vplivov so z rdečo označene povezave, ki večajo, vrednosti na katere vplivajo, z modro pa tiste povezave, ki manjšajo vrednosti, na katere vplivajo. Z odebelenim besedilom so označene vrednosti, na katere sami vplivamo in na ta način ustvarjamo strategijo upravljanja vzdrževanja voznega parka.

Slika 6: Diagram vplivov v modelu vzdrževanja vozil



Vir: Prilagojen model na osnovi Bivona (2005), Sterman (2000, str. 66), Varelis (2002)

Strategija preventivnega vzdrževanja vpliva pozitivno na frekvenco preventivnega vzdrževanja in to večja število vozil, ki bodo na preventivnem vzdrževanju. Količina vozil, ki je v postopku preventivnega vzdrževanja, pa negativno vpliva na razpoložljivost vozil. Torej manjša število vozil, ki so na razpolago za izvajanje storitev. Po drugi strani pa dejansko preventivno vzdrževanje (ne tisto, ki je planirano, ampak dejansko izvedeno) manjša stopnjo okvar. Hkrati pa število



preventivnih vzdrževanj večja stroške vzdrževanja, stroški vzdrževanja pa manjšajo dobiček.

Strategija obnovitev voznega parka vpliva na količino vozil, ki jih bomo menjali z novimi. To bo manjšalo povprečno starost vozil. Povprečna starost vozil pozitivno vpliva na stopnjo okvar vozil (jo večja), stopnja okvar večja število vozil, ki so v okvari. Vozila v okvari manjšajo razpoložljivost vozil, hkrati vozila v okvari povečujejo stroške popravil, kar manjša dobiček. Strategija obnavljanja voznega parka pozitivno vpliva na stroške za obnavljanje voznega parka, to pa negativno vpliva na dobiček.

Strategija zaposlovanja pozitivno vpliva na število novincev. To bo pozitivno vplivalo na število izkušenih vzdrževalcev po tem, ko novinci opravijo izobraževanje oziroma uvajanje. Novinci in izkušeni pa skupaj pozitivno vplivajo na kapaciteto ekipe vzdrževalcev, ki manjša število vozil v okvari, kar je zopet ugodno za razpoložljivost vozil. Večja kapaciteta vzdrževalcev večja stroške za plače vzdrževalcev, to pa negativno vpliva na dobiček.

Vozila v okvari prav tako negativno vplivajo na količino vozil na preventivnem vzdrževanju, saj v primeru zasedenosti z odpravljanjem okvar vzdrževalci ne utegnejo opravljati preventivnih vzdrževanj.

Razpoložljivost vozil nam torej manjšajo tako vozila v okvari kot tudi vozila na preventivnem vzdrževanju. Razpoložljivost vozil pozitivno vpliva na sposobnost za izvajanje storitev, storitve večajo prihodek, prihodek pa večja dobiček.

## **5.2 Izgradnja simulacijskega modela po posameznih modulih**

Po tem ko je izdelan osnovni diagram vplivov, pristopimo k izgradnji posameznih modulov, ki na koncu združeni predstavljajo simulacijski model. Najprej določimo modul upravljanja z voznim parkom, v naslednji fazi modeliramo vpliv preventivnega vzdrževanja na pojavljanje okvar, nato modeliramo sistem upravljanja z vzdrževalnimi nalogami, sledijo kapacitete in na koncu modeliramo še modul prihodkov in odhodkov.

### **5.2.1 Modul upravljanja z voznim parkom**

Vozni park oziroma vozila v njem definiramo kot populacijo in jo razdelimo v starostne skupine. To je primerno za ta primer tudi zato, ker starost vpliva na stopnjo okvar, ki je pri starejših vozilih večja. Za upravljanje z voznim parkom tako skonstruiramo starostno verigo iz nivojev, ki v tem primeru predstavlja skupino vozil v določenem starostnem razredu. V splošnem je starostna veriga lahko sestavljena iz poljubnega števila skupin ter pritokov in odtokov v in iz posamezne skupine (Serman, 2000, str. 470). Material pa v splošnem potuje iz ene skupine v drugo po tranzicijski stopnji. Tranzicijska stopnja ne obstaja le pri vstopu v prvo skupino in izstopu iz zadnje skupine. Splošna enačba za stanje  $i$ -te skupine v starostni verigi, je:

$$C_i(t) = \int_{t_0}^t [I_i(t) + Ts_{i-1,i}(t) - O_i(t) - Ts_{i,i+1}(t)] dt + C_i(t_0) \quad (4)$$

Kjer je:

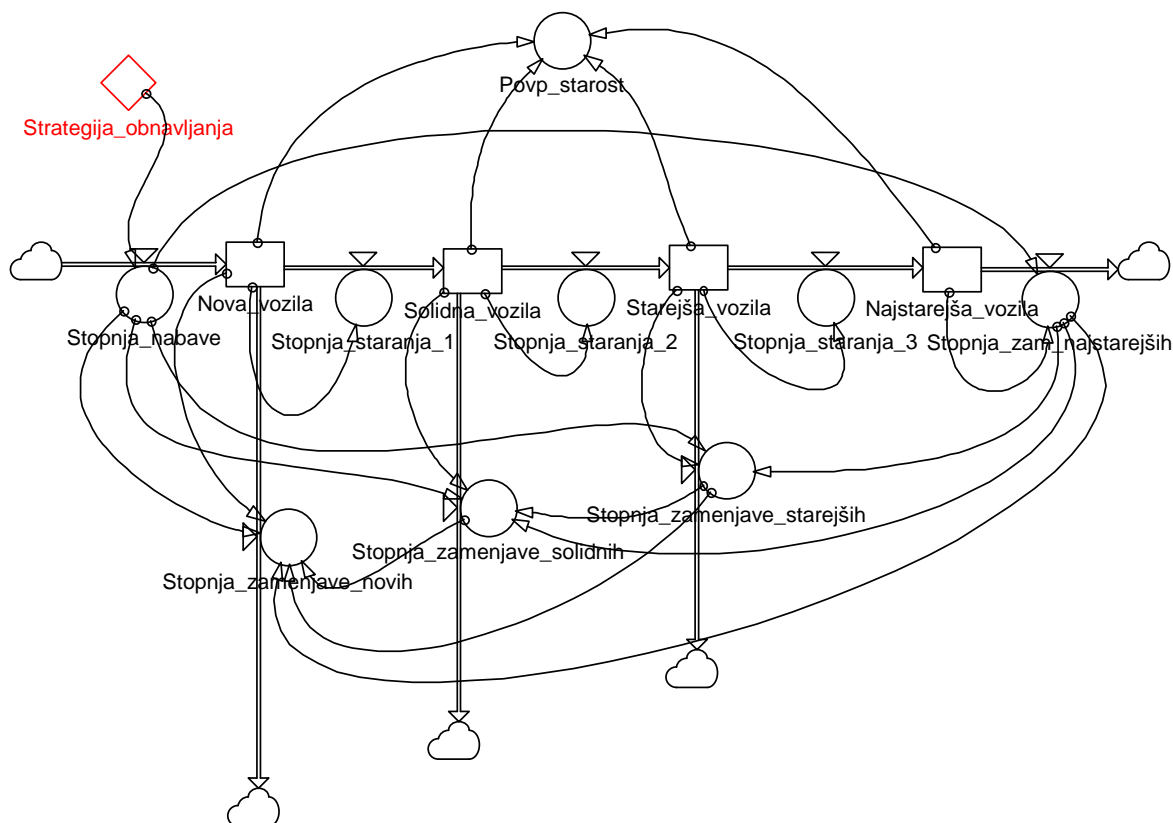
- $C_i(t)$  - stanje v i-ti skupini v poljubnem času t,
- $I_i(t)$  - pritok v i-to skupino,
- $Ts_{i-1,i}(t)$  - tranzicijska stopnja iz skupine i-1 v skupino i,
- $O_i(t)$  - odtok iz i-te skupine,
- $Ts_{i,i+1}(t)$  - tranzicijska stopnja iz skupine i v skupino i+1,
- $C_i(t_0)$  - začetno stanje v i-ti skupini.

Takšna razdelitev je uporabljena tudi pri analizi staranja, razpoložljivosti in vzdrževanja ameriških vojaških letal (Alfred L., 2000), kjer so letala razdeljena v tri starostne skupine. Skupine za model vzdrževanja vozil pa v našem primeru razdelimo v štiri starostne skupine:

- Nova (do 5 let, povprečna starost 2,5 let),
- Solidna (do 10 let, povprečna starost 7,5 let),
- Starejša (do 15 let, povprečna starost 12,5 let),
- Najstarejša (nad 15 let, povprečna starost 17,5 let).

Na sliki 7 je prikazan model upravljanja z vozili pri konstantnem obsegu voznega parka izražen s simboli programskega jezika.

Slika 7: Modul upravljanja z voznim parkom



Vir: Prilagoditev modela Alfred (2000)

Na sliki 7 so prikazane skupine vozil, kot smo jih določili po starostnih skupinah. Vsaka starostna skupina je predstavljena z enim nivojem. Nova vozila se dopolnjujejo s stopnjo nabave, ki je odvisna od strategije obnavljanja. Strategija obnavljanja predstavlja odločitev upravljavca. Vozila prehajajo v novo starostno skupino po stopnjah staranja. Koliko jih preide v novo skupino, je odvisno od števila vozil, ki so v prejšnji skupini. Vozila zapuščajo skupine tudi zaradi zamenjav. Zamenjave so odvisne od nabave. Zamenjave se vršijo tako, da najprej menjamo najstarejša vozila. Tako so stopnje zamenjav odvisne od stopnje nabave in stopnje zamenjav v starejših razredih. Pred izvajanjem simulacij je potrebno določiti začetno stanje nivojev. To pomeni, da vstavimo vrednosti po posameznih skupinah glede na stanje voznega parka, ki je na začetku simulacije.

Tako določimo stopnjo nabave:

$$St_{nab} = S_{obn} / 52 \quad (5)$$

Kjer je:

$St_{nab}$  - stopnja nabave,  
 $S_{obn}$  - strategija obnavljanja.

Strategijo obnavljanja izrazimo s številom nabavljenih vozil letno, zato to vrednost delimo z 52, da dobimo stopnjo nabave. Stopnjo nabave izrazimo z vozili na teden, saj izberemo za osnovno časovno enoto simulacije en teden.

Imamo tri stopnje staranja, torej prehode iz ene skupine v drugo. Stopnja staranja je odvisna od količine vozil (ali v splošnem populacije v nižjem razredu) in širine razreda, torej kako dolgo ostane ena enota populacije v posameznem razredu.

$$St_i = N_i / T_r \quad (6)$$

Tu je:

$St_i$  - stopnja staranja v i-tem razredu,  
 $N_i$  - število vozil v razredu,  
 $T_r$  - širina razreda (v tem primeru 5 let oziroma 260 tednov).

To velja za prve tri razrede, po isti stopnji pa prehajajo vozila v naslednje razrede, razen v prvega, kar pa je opisano z enačbo (5).

Število vozil v i-tem nivoju ali v i-ti skupini (razredu) nam poda naslednja enačba:

$$V_i(t) = \int_{t_0}^t [St_{i-1} - St_{i+1} - Sz_i] dt + V_z \quad (7)$$

Kjer je:

$V_i$  - število vozili v i-tem razredu,  
 $V_z$  - začetno število vozil v i-tem razredu,  
 $St_{i-1}, St_{i+1}$  - stopnji staranja,  
 $Sz_i$  - stopnja zamenjave vozil v i-tem razredu.

To velja v splošnem za vse razrede, razen za prvega, kjer pritok nastaja zaradi stopnje nabave, in zadnjega, kjer odtok nastaja samo zaradi stopnje zamenjave.

Določiti je potrebno še stopnjo zamenjave. Vozila izločamo iz najstarejše skupine. Če je v tej skupini manj vozil kot nabavimo novih, potem jih izločamo iz naslednje skupine mlajših vozil. Stopnjo zamenjave najstarejših vozil določimo s pomočjo funkcije MIN, ki določi minimalno število izmed tistih, ki so na voljo. Enačba za stopnjo zamenjave najstarejših vozil ima naslednjo obliko:

$$S_{z_{ns}} = \text{MIN}(V_{ns}/52; St_{nab}) \quad (8)$$

Stopnjo zamenjave iz razreda starejših vozil pa določimo:

$$S_{z_{ns}} = \text{MIN}(V_s/52; St_{nab} - S_{z_{ns}}) \quad (9)$$

V enačbah (8) in (9) je:

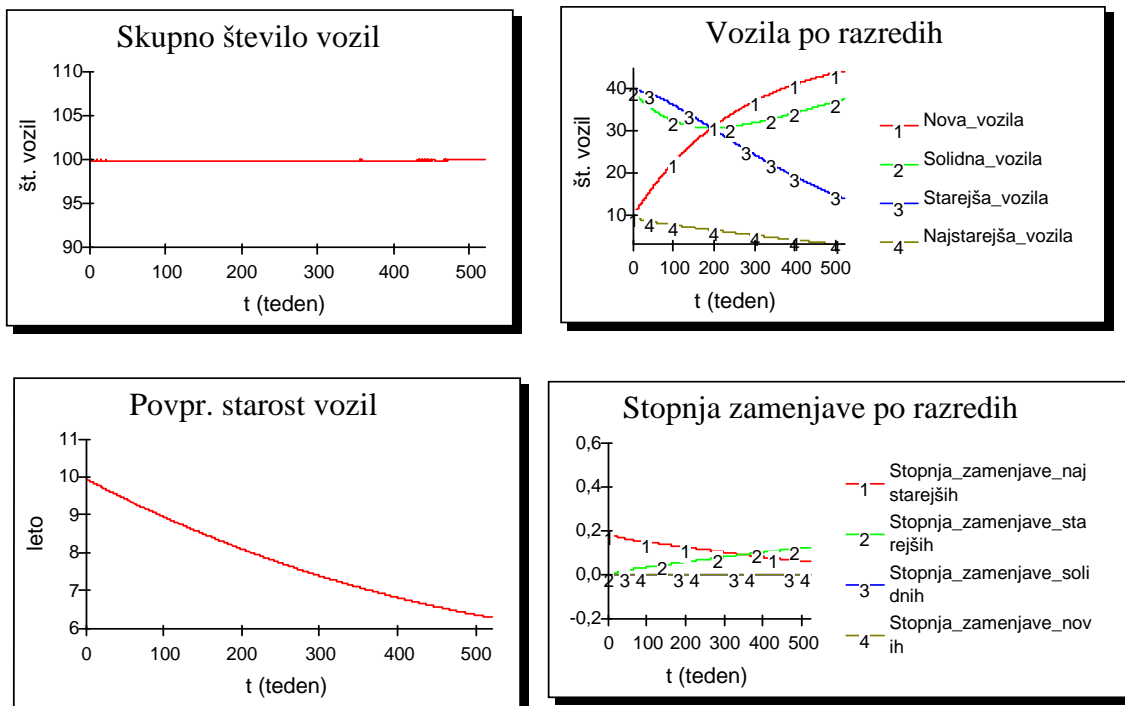
- Sz - stopnja zamenjave,
- V - število vozil v posamezni skupini.

Vrednosti števila vozil delimo z 52, ker so to tedenske stopnje. Na podoben način, kot je opisan v enačbi (9), dobimo še stopnje zamenjav za solidna in nova vozila. Pri vozilih v drugi starostni skupini od stopnje nabave in stopnje zamenjave najstarejših odštejemo še stopnjo zamenjave starejših, pri novih vozilih pa še stopnjo zamenjave solidnih.

Dodatno modeliramo še enačbe, s pomočjo katerih lahko spremljamo povprečno starost voznega parka in pa skupno število vozil, kar sta pomembna podatka. Skupno število vozil je sicer v osnovnem modelu konstantno, je pa ta podatek toliko bolj pomemben, ko prilagajamo vozni park različnim oblikam zunanjega povpraševanja.

Obnašanje sistema lahko spremljamo na grafih, kot je prikazano na sliki 8.

Slika 8: Spremljanje parametrov voznega parka



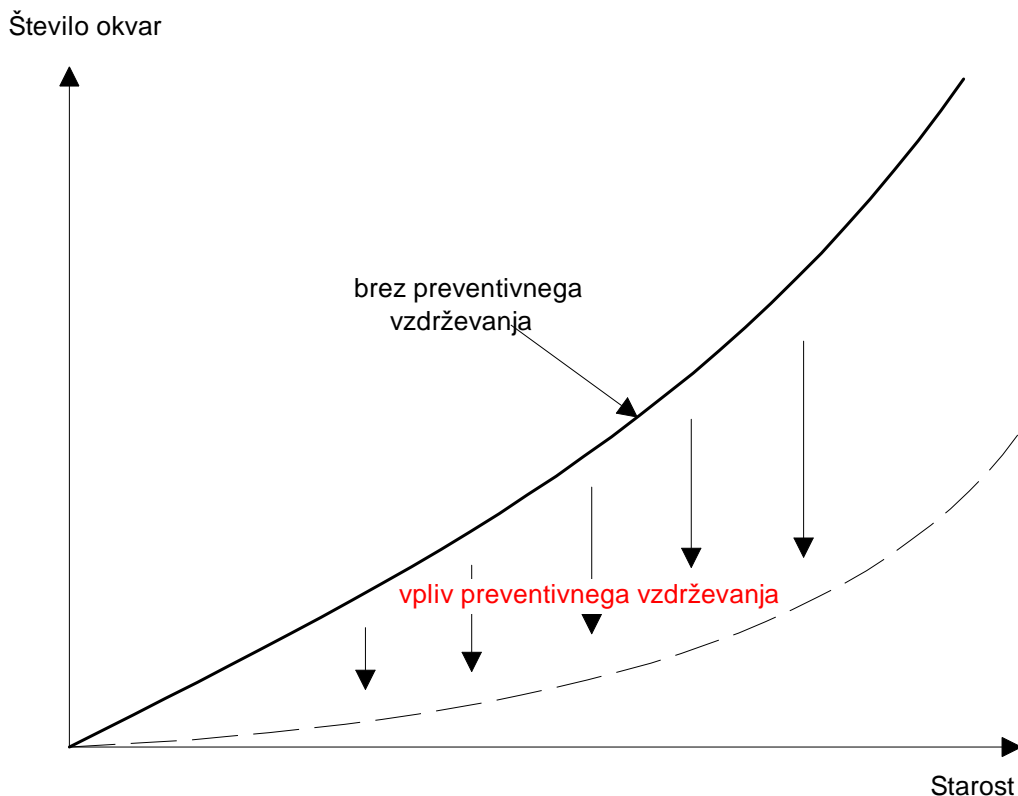
Vir: Lastna simulacija

Slika 8 kaže, kako lahko ob simulacijah spremljamo spreminjanje posameznih parametrov voznega parka skozi čas. Najzanimivejši podatki so: skupno število vozil, vozila po posameznih razredih, povprečna starost vozil in stopnja zamenjave. Iz diagramov je razvidno, da je bila v tem primeru izbrana strategija, ki precej pomladi in izboljša strukturo voznega parka. Povprečna starost se precej manjša, poveča pa se delež novih vozil na račun starejših, najstarejša pa počasi izginejo. Vozila menjamo iz najstarejšega razreda, vendar ta stopnja pada, zato pa kmalu začne rasti menjavanje iz skupine starejših (ker se zmanjšuje število vozil v najstarejšem razredu). Stopnja zamenjave iz prvih dveh skupin je enaka nič.

## 5.2.2 Vpliv preventivnega vzdrževanja na okvare

Kot je omenjeno v četrtem poglavju, preventivno vzdrževanje zmanjša število nepredvidenih okvar, popolnoma izniči pa jih ne. V tem modulu je obdelan vpliv preventivnega vzdrževanja na manjšanje okvar. Kar se želi doseči s preventivnim vzdrževanjem, je poenostavljeno prikazano na sliki 9.

Slika 9: Vpliv preventivnega vzdrževanja na pojavljanje okvar



Vir: Lastna slika

Na sliki 9 je opisano, kako izgleda krivulja nastajanja okvar v odvisnosti od starosti opreme. Cilj preventivnega vzdrževanja je, da to krivuljo zniža, popolnoma odpraviti pa je ne more.

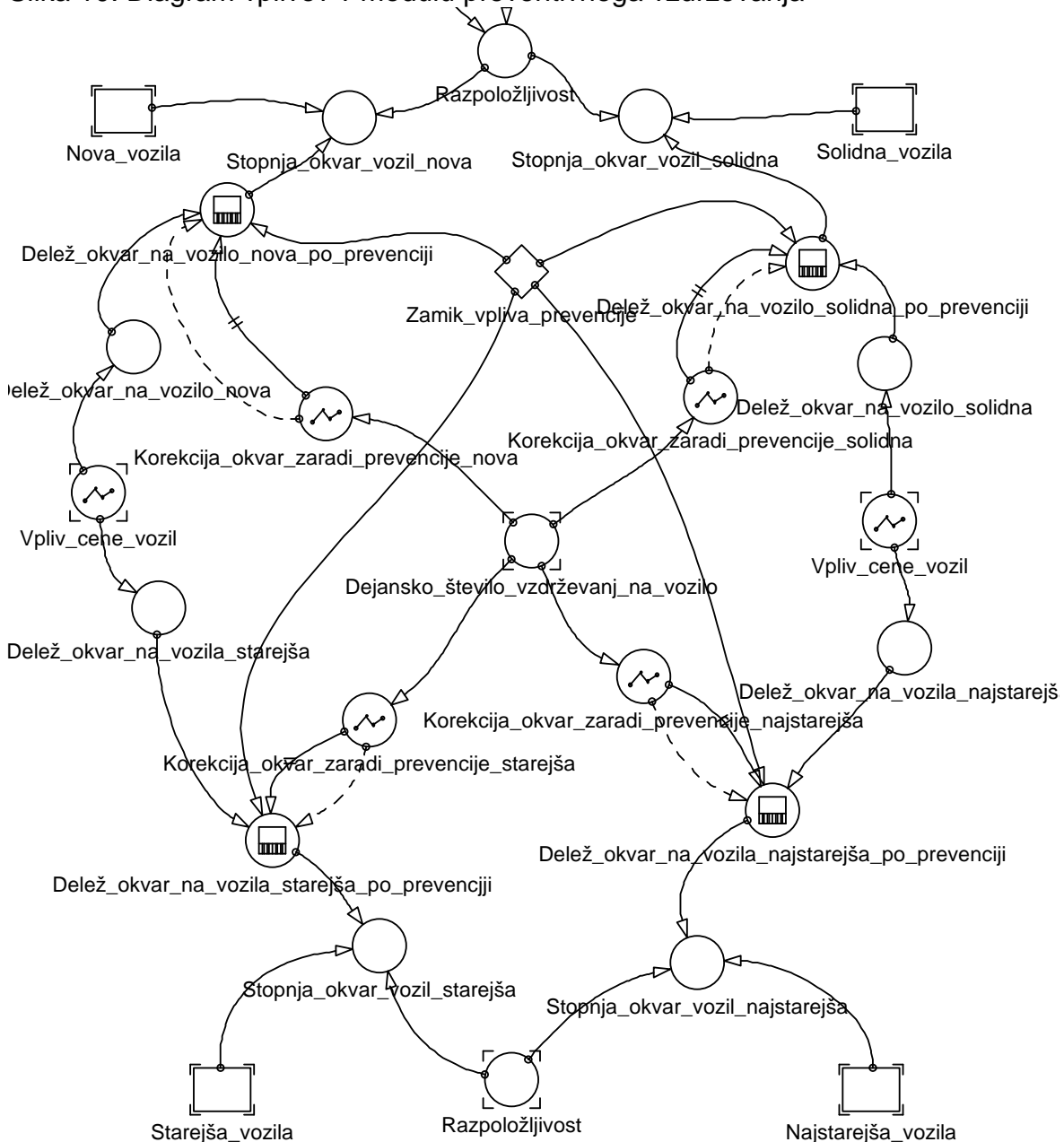
Tako tudi v tem modulu upoštevamo, da so stopnje okvar po posameznih starostnih skupinah vozil različne. Nova vozila se kvarijo najmanj, najstarejša pa

največ. Tako imamo za vsak razred oziroma skupino vozil različno stopnjo okvar na vozilo. To pomeni da je skupna stopnja okvar precej odvisna tudi od števila vozil v posamezni starostni skupini. Torej je poleg strategije preventivnega vzdrževanja pomembna tudi strategija obnovitev voznega parka, ki je obdelana v prejšnjem modulu.

Na manjšanje stopnje okvar vpliva samo dejansko število vzdrževanj na vozilo in ne tisto, ki se določi v strategiji. Možnost za vzdrževalne posege pa je omejena s številom vozili v okvari, torej s samo stopnjo okvar vozil in pa kapaciteto vzdrževalcev. Tako ob neprimernih odločitvah na preostalih področjih, ni nujno da bomo dosegli zaželeno število vzdrževanj na vozilo.

Samo vzdrževanje pa na skupno sliko nima takojšnjega učinka, zato se vpliv pokaže šele ob določenem časovnem zamiku, ki ga upoštevamo v simulacijskem modelu. Diagram vplivov je prikazan na sliki 10.

Slika 10: Diagram vplivov v modulu preventivnega vzdrževanja



Vir: Prilagoditev modela Varelis (2002)

Iz slike 10 je razvidno, da je osrednja vrednost v tem modulu dejansko število vzdrževanj na vozilo. Ta vrednost izhajajo iz modula upravljanja vzdrževalnih nalog. Na osnovi te vrednosti pa pridemo do korekcije stopnje okvar po preventivnih posegih.

Ker se ukvarjamo s strategijami, ne razčlenjujemo posameznih preventivnih posegov v operativnem smislu (menjave olja, menjave filtrov, pregledi zavor, menjave pnevmatik ...), ampak poenostavimo za en preventivni poseg enak povprečen čas in enak povprečen strošek. V tem smislu določimo, da nič preventivnih posegov poveča stopnjo okvar, en poseg zadrži stopnjo okvar na istem nivoju, večje število posegov pa manjša stopnjo okvar. Korekcijo okvar zaradi vpliva preventivnih posegov dobimo s funkcijo GRAPH, kar pomeni, da določimo vpliv na korekcijo s krivuljo, ki je odvisna od vrednosti dejanskega števila vzdrževanj na vozilo. Korekcija zaradi vpliva preventivnih posegov je določena z enačbo:

$$K_{prev} = GRAPH(Vz_{dej}; K_1, K_2, \dots, K_n) \quad (10)$$

Tu pomeni:

- $K_{prev}$  - korekcija zaradi preventivnega vzdrževanja,
- $Vz_{dej}$  - dejansko število vzdrževanj,
- $K_i$  - korekcija ob i-tem dejanskem številu vzdrževanj.

Funkcija opisana z enačbo (10) omogoča, da določimo korekcijo stopnje okvar na osnovi dejanskega števila preventivnih vzdrževanj. Ta enačba velja za vsako skupino vozil. Korekcija okvar zaradi preventivnih posegov nas pripelje do novega deleža okvar na vozilo, ki nas na koncu vodi do stopnje okvar vozil. Tu upoštevamo časovni zamik, ki je potreben, da število preventivnih vzdrževanj doseže svoj učinek, zato si pomagamo s funkcijo DELAY. Ta funkcija omogoča, da določena vrednost učinkuje šele po določenem časovnem zamiku. Popravljen delež okvar je prikazan z enačbo (11), ki prav tako velja za vsako starostno skupino vozil.

$$Ok_{prev i} = Ok_i (1 + DELAY(K_{prev}; Td)) \quad (11)$$

V enačbi so:

- $Ok_{prev i}$  - delež okvar na vozilo po vplivu preventivnih posegov v i-tem razredu,
- $Ok_i$  - delež okvar na vozilo v i-tem razredu,
- $K_{prev}$  - korekcija zaradi preventivnega vzdrževanja,
- $Td$  - časovni zamik po katerem učinkuje preventivno vzdrževanje.

Enačba (11) nam pove, za koliko se korigira delež okvar na vozilo kot posledica vpliva preventivnega vzdrževanja po preteku časovnega zamika  $Td$ . Torej ta enačba prikazuje korekcijo vrednosti  $Ok_i$  v času  $T$  v odvisnosti od vrednosti  $K_{prev}$  v času  $T - Td$ . Enačba (11) je enakovredna izrazu:

$$Ok_{prev i}(T) = Ok_i(T) * (1 + K_{prev}(T - Td)) \quad (12)$$

Delež okvar na vozilo je odvisen od starosti vozila, torej je določen za vsako starostno skupino vozil posebej. Delež okvar na vozilo pa je odvisen tudi od

kvalitete vozila, kvaliteta pa je povezana s ceno. Tako je delež okvar na vozilo odvisen tudi od nabavne cene vozila.

Ko imamo podan delež okvar na vozilo po preventivnih posegih, je potrebno določiti le še stopnjo okvar na vozilo po posameznih skupinah. Ta je odvisna od deleža okvar na vozilo po vplivu preventivnih posegov in od števila vozil v posameznem razredu ter razpoložljivosti, kar je prikazano z naslednjo enačbo:

$$St_{okvi} = Ok_{previ} * V_i * R \quad (13)$$

Enačba (13) velja za vsak posamezen razred, simboli pa predstavljajo:

$St_{okvi}$  - stopnja okvar vozil v i-tem razredu,

$V_i$  - število vozil v posameznem razredu,

R - razpoložljivost.

Stopnja okvar se generira iz razpoložljivega števila vozil. V ta namen v enačbi (13) upoštevamo razpoložljivost, ki je razmerje med številom razpoložljivih vozil (niso v okvari in niso v postopku preventivnega vzdrževanja) in skupnim številom vozil v voznem parku. Tako dobimo stopnjo okvar vozil po posameznih starostnih skupinah. Skupna stopnja okvar pa je seštevek stopenj okvar po posameznih razredih:

$$St_{okv} = \sum_{i=1}^4 St_{okvi} \quad (14)$$

Na ta način dobimo skupno stopnjo okvar vozil, ki jo potrebujemo v modulu upravljanja z vzdrževalnimi nalogami.

Tudi tu lahko s pomočjo diagramov spremljamo različne parametre, kot so skupna stopnja okvar vozil tedensko, stopnja okvar po razredih ali pa delež okvar na vozilo po posameznih razredih.

### 5.2.3 Modul upravljanja z vzdrževalnimi nalogami

V tem sklopu simuliramo dogajanje v delavnici. Vzdrževalci imajo dve vrsti nalog:

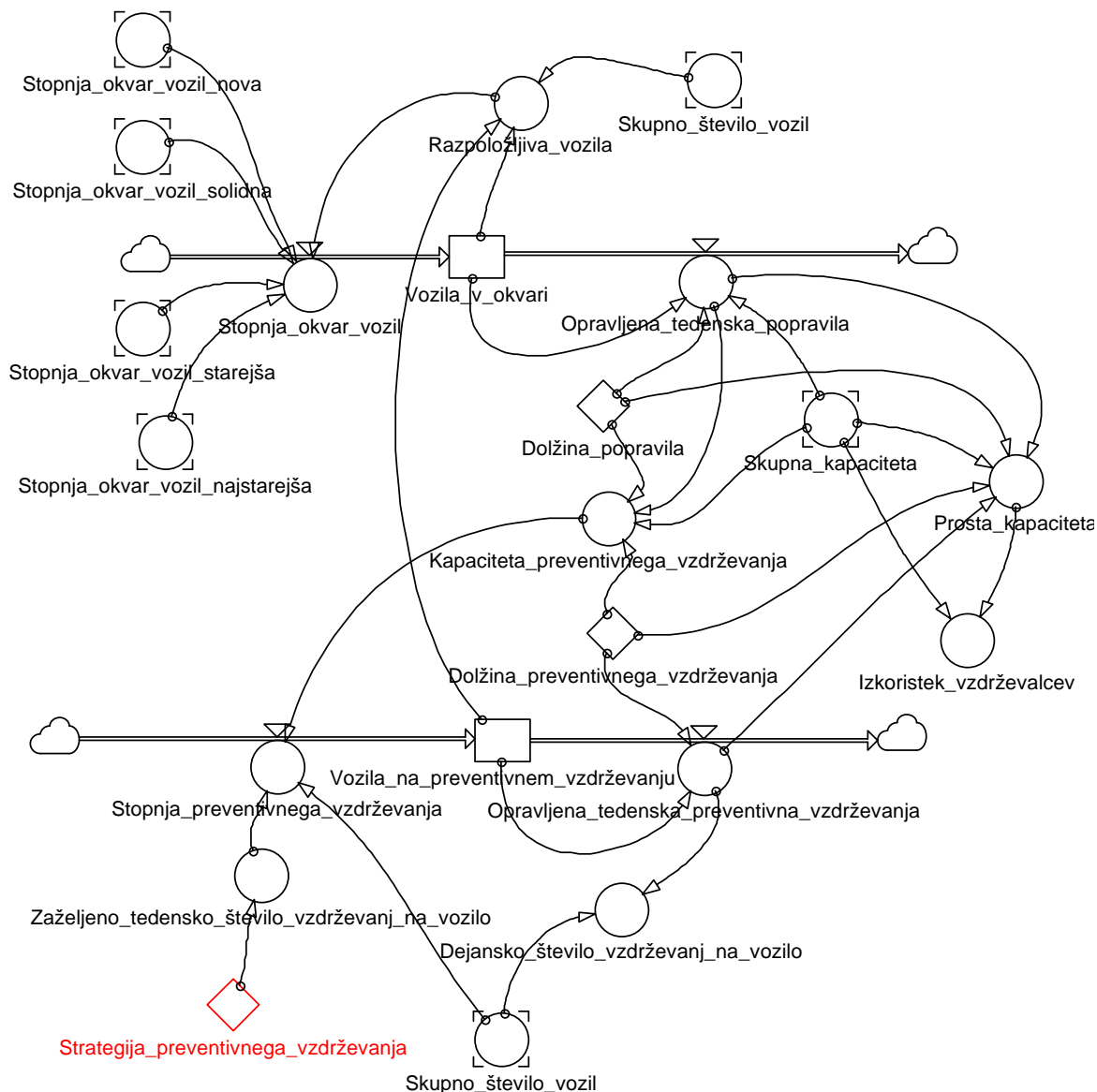
- naloge odpravljanja okvar in
- naloge preventivnega vzdrževanja.

Za razliko od Varelisovega modela tu združimo modula odpravljanje okvar in preventivno vzdrževanje ter skonstruiramo model po načelu vzporednih pretokov.

Strukture vzporednih pretokov se uporabljajo, da lahko spremljamo parametre različnih elementov, ki potujejo skozi sistem (Sterman, 2000, str. 497). V tem primeru so to okvarjena vozila in vozila, ki so na razporedu za preventivno vzdrževanje na svoji poti skozi delavnico. Kot je že omenjeno, je potrebno v vsakem primeru razpoložljivo kapaciteto vzdrževalcev najprej izkoristiti za odpravljanje okvar, šele potem pa pridejo na vrsto preventivna vzdrževanja. Praktično to pomeni, da se razporedijo vozila na posege preventivnega vzdrževanja le v primeru, ko so zaznane proste kapacitete vzdrževalcev v skladu z načrtom preventivnega vzdrževanja. Struktura modela, ki prikazuje dva vzporedna toka vozil skozi delavnico, je prikazana na sliki 11.



Slika 11: Modeliranje dogodkov v delavnici



Vir: Prilagoditev modela Sterman (2002)

Slika 11 prikazuje razmerja in medsebojne vplive posameznih elementov sistema v delavnici. Imamo dva nivoja, in sicer nivo vozil v okvari in nivo vozil na preventivnem vzdrževanju.

Nivo vozil v okvari se polni s stopnjo okvar, ki je izražena z vozili/teden, in nam pove, koliko vozil se tedensko pokvari. Prazni pa se s številom opravljenih tedenskih popravil, ki jih izvedejo vzdrževalci. Enačba je naslednja:

$$V_{okv}(t) = \int_{t_0}^t [St_{okv} - P] dt + V_{okv t_0} \quad (15)$$

Kjer je:

- $V_{okv}$  - število vozil v okvari,
- $V_{okv\ t0}$  - začetno število vozil v okvari,
- $S_{okv}$  - stopnja okvar vozil,
- $P$  - število opravljenih popravil na teden.

Stopnja okvar vozil je seštevek stopenj okvar vozil po posameznih starostnih skupinah, kar je prikazano z enačbo (14). Opravljena tedenska popravila pa so odvisna od števila vozil v okvari in časa, ki je potreben za popravilo, omejena pa so s skupno kapaciteto vzdrževalcev, zato v tem primeru uporabimo funkcijo MIN:

$$P = MIN \left( V_{okv} / T_p ; K \right) \quad (16)$$

Tu je:

- $T_p$  - čas potreben za popravilo,
- $K$  - skupna kapaciteta vzdrževalcev (št. popravil/teden).

Vzporedno temu teče tok preventivnega vzdrževanja. Nivo vozil na preventivnem vzdrževanju se polni s stopnjo preventivnega vzdrževanja, prazni pa se z opravljenimi tedenskimi preventivnimi vzdrževanji, kar nam prikazuje naslednja enačba.

$$V_{prev}(t) = \int_{t_0}^t [St_{prev} - P_{prev}] dt + V_{prev\ t0} \quad (17)$$

Tu je:

- $V_{prev}(t)$  - število vozil v postopku preventivnega vzdrževanja v času  $t$ ,
- $V_{prev\ t0}$  - začetno število vozil na preventivnem vzdrževanju,
- $St_{prev}$  - stopnja preventivnega vzdrževanja,
- $P_{prev}$  - število opravljenih tedenskih preventivnih vzdrževanj.

Tedenska stopnja preventivnega vzdrževanja je odvisna od zaželenega letnega števila vzdrževanj na vozilo, omejena pa je s kapaciteto preventivnega vzdrževanja. Koliko vozil se tedensko pošlje na preventivno vzdrževanje, določimo s funkcijo MIN.

$$St_{prev} = MIN \left( P_{žel} * V / 52 ; K_{prev} \right) \quad (18)$$

Tu je:

- $P_{žel}$  - želeno število vzdrževanj na vozilo,
- $V$  - skupno število vozil,
- $K_{prev}$  - kapaciteta preventivnega vzdrževanja (prev. vzd./teden).

Kapaciteta preventivnega vzdrževanja je tista, ki nam ostane glede na naloge popravil okvar in jo določimo:

$$K_{prev} = (K - P) * \left( \frac{T_p}{T_{prev}} \right) \quad (19)$$

Tu je:

$T_p$  - povprečen čas potreben za eno popravilo,  
 $T_{prev}$  - povprečen čas potreben za en preventivni poseg.

V enačbi (19)  $T_{prev}$  pomeni čas, ki je potreben za eno preventivno vzdrževanje. Tako je kapaciteta preventivnega vzdrževanja izražena z razliko med skupno kapaciteto in številom opravljenih tedenskih popravil, pomnoženo z razmerjem časov, ki so potrebni za posamezno opravilo. Število opravljenih tedenskih preventivnih vzdrževanj, ki praznijo nivo števila vozil na preventivnem vzdrževanju, pa izrazimo na naslednji način:

$$P_{prev} = \frac{V_{prev}}{T_{prev}} \quad (20)$$

Nivo vozil na preventivnem vzdrževanju se prazni v odvisnosti od števila vozil na preventivnem vzdrževanju in povprečnega časa, ki je potreben za eno preventivno vzdrževanje. Število opravljenih tedenskih preventivnih vzdrževanj je podatek, ki pove, koliko je dejansko število vzdrževanj na vozilo. Dejansko letno število vzdrževanj na vozilo je:

$$P_{prev l} = P_{prev} * 52 / V \quad (21)$$

Dejansko letno število vzdrževanj na vozilo je tako enako tedenskemu številu vzdrževanj na vozilo pomnoženemu s številom tednov in deljeno s skupnim številom vozil.

Naslednji pomemben parameter, ki ga dobimo v tem modulu, je število razpoložljivih vozil. Število razpoložljivih vozil je odvisno od skupnega števila od katerega odštejemo število vozil, ki so v delavnici razporejena na prej opisanih posegih.

$$V_r = V - V_{okv} - V_{prev} \quad (22)$$

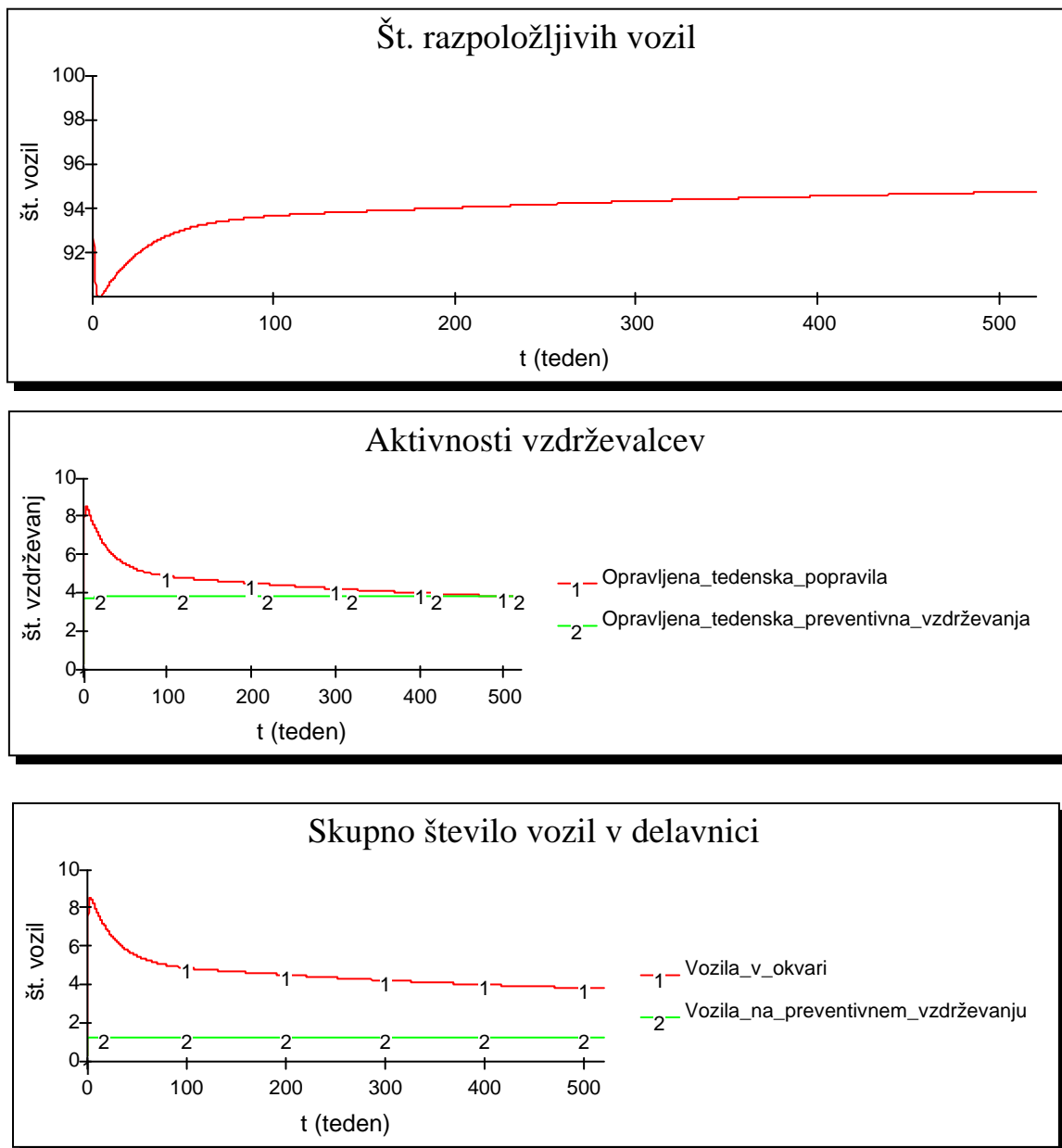
Tu je:

$V_r$  - število razpoložljivih vozil.

Na ta način so razpoložljiva vozila v sistemu izražena s skupnim številom vozil od katerih odštejemo vozila v okvari in vozila na preventivnih posegih.

Tudi tu lahko z diagrami spremljamo obnašanje posameznih zanimivih parametrov sistema.

Slika 12: Spremljanje parametrov vzdrževalnih aktivnosti



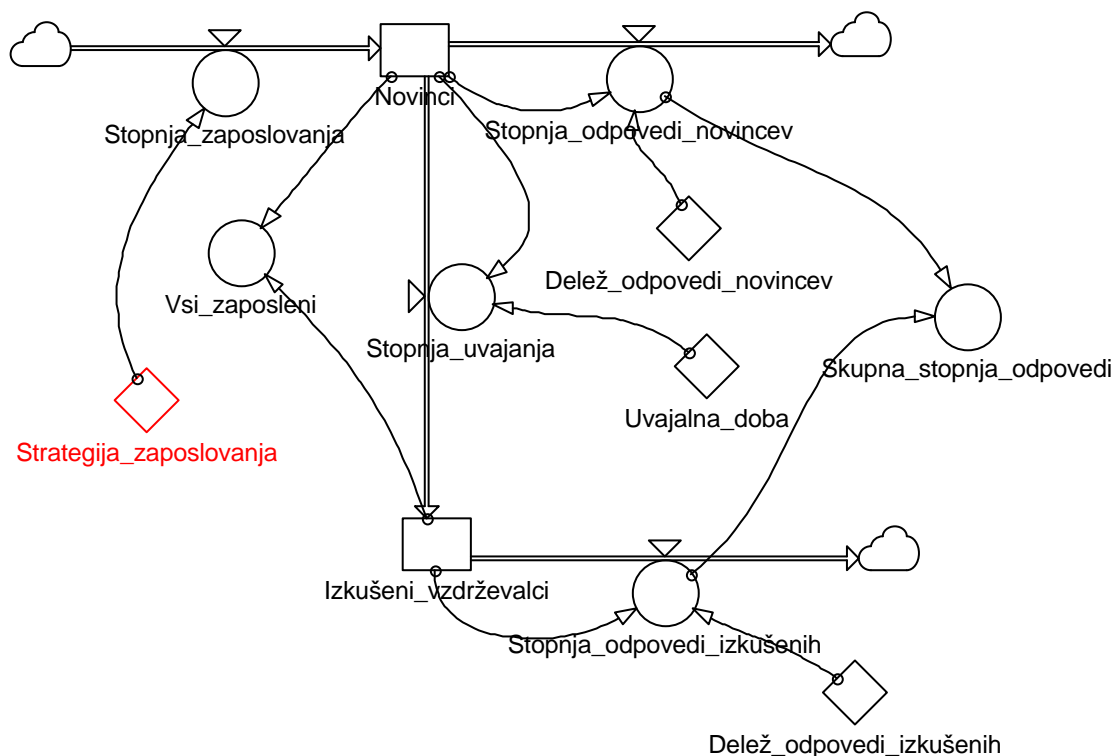
Vir: Lastna simulacija

Slika 12 kaže nekatere parametre, ki jih lahko spremljamo med izvajanjem simulacij. V tem primeru so ti parametri število razpoložljivih vozil in pa aktivnosti vzdrževalcev ter skupno število vozil v delavnici. Pri diagramu aktivnosti vzdrževalcev spremljamo, koliko posegov popravil okvar in koliko posegov preventivnih vzdrževanj opravijo vzdrževalci tedensko. Diagram, ki prikazuje skupno število vozil v delavnici, pa kaže število vozil, ki so trenutno v delavnici zaradi okvar in pa število vozil, ki so trenutno v delavnici zaradi preventivnih posegov. Po potrebi pa lahko spremljamo tudi druge parametre, kot so dejansko število vzdrževanj na vozilo ali pa na primer izkoristek kapacitet.

## 5.2.4 Modul upravljanja s človeškimi viri

Ta del je prirejen simulaciji procesa zaposlovanja novih vzdrževalcev. Modeliramo ga na način dveh nivojev, nivoja novincev in nivoja izkušenih vzdrževalcev. Tak način je primeren, ko je potrebno modelirati vpliv učinka zamika usposabljanja in prilagajanja novih delavcev ali pač na splošno novih elementov v sistem, ki rabijo določen čas, da delujejo na nivoju elementov, ki so že vpeljani v sistem (Sterman, 2000, str. 490). Model poenostavimo in predpostavimo, da zaposlujemo le začetnike oziroma neizkušene vzdrževalce. V praktičnem primeru seveda lahko kadarkoli zaposlimo kogarkoli, vendar tu preučujemo strategije in je potrebno določiti nekatere predpostavke. Sicer pa tudi zaposlovanje bolj izkušenih ne pomeni, da so takoj popolnoma pripravljeni na delovne naloge. Tudi oni se morajo prilagoditi na način dela in kulturo ter običaje podjetja, ki so lahko od podjetja do podjetja popolnoma različni. Način modeliranja procesa zaposlovanja je prikazan na sliki 13.

Slika 13: Modeliranje procesa zaposlovanja



Vir: Prilagoditev modela Sterman (2000)

Slika 13 prikazuje model ravnanja s človeškimi viri. Ko načrtujemo strategijo zaposlovanja, moramo upoštevati predvsem to, da nekateri delavci zapuščajo podjetje iz različnih razlogov in pa čas, ki je potreben, da se novinci polno usposobijo in prilagodijo. Prvi nivo predstavlja novinci. Enačba, ki ponazarja stanje novincev v podjetju, je naslednja:

$$N(t) = \int_{t_0}^t [St_{zap} - St_{uv} - St_{odn}] dt + N_{t_0} \quad (23)$$

Kjer je:

- N - število trenutno zaposlenih novincev,
- $N_{t_0}$  - začetno število zaposlenih novincev,
- $St_{zap}$  - stopnja zaposlovanja,
- $St_{uv}$  - stopnja uvajanja,
- $St_{odn}$  - stopnja odpovedi novincev.

Stopnja zaposlovanja je odvisna od določene strategije zaposlovanja, stopnja odpovedi novincev je odvisna od predvidevanj, koliko novincev bo odstopilo od zaposlitve v podjetju, stopnja uvajanja pa je odvisna od števila novincev in povprečnega časa, ki je potreben za uvajanje novincev, ter jo izračunamo:

$$St_{uv} = N / T_{uv} \quad (24)$$

Kjer je:

- $T_{uv}$  - povprečen čas uvajanja novincev.

Nivo oziroma število izkušenih delavcev, ki so na razpolago, pa je odvisno od stopnje uvajanja, torej števila novincev in časa, ki je potreben za uvajanje, ter stopnje, po kateri zapuščajo delavci podjetje. Število izkušenih delavcev je določeno z naslednjo enačbo:

$$I(t) = \int_{t_0}^t [St_{uv} - St_{odi}] dt + I_{t_0} \quad (25)$$

Kjer je:

- I - število trenutno zaposlenih izkušenih delavcev,
- $I_{t_0}$  - začetno število zaposlenih izkušenih delavcev,
- $St_{odi}$  - stopnja odpovedi izkušenih delavcev.

Stopnja uvajanja je določena z enačbo (24), stopnja odpovedi izkušenih delavcev pa je odvisna od predvidevanj, koliko izkušenih delavcev bo v prihodnje zapustilo podjetje. Potrebno je modelirati način, na katerega bomo spremljali parametre kot sta skupna kapaciteta, ki pove, koliko vozil tedensko lahko popravi ekipa vzdrževalcev in pa povprečna kapaciteta na zaposlenega vzdrževalca.

Na skupno kapaciteto vpliva število zaposlenih novincev in njihova kapaciteta ter število zaposlenih izkušenih ter njihova kapaciteta. Za kapaciteto uporabimo naslednji izraz:

$$K = K_i * (K_n * N + I) \quad (26)$$

Kjer je:

$K$  - skupna kapaciteta (popravila/teden),

$K_i$  - kapaciteta izkušenih delavcev,

$K_n$  - kapaciteta novincev.

Povprečno kapaciteto na zaposlenega izračunamo:

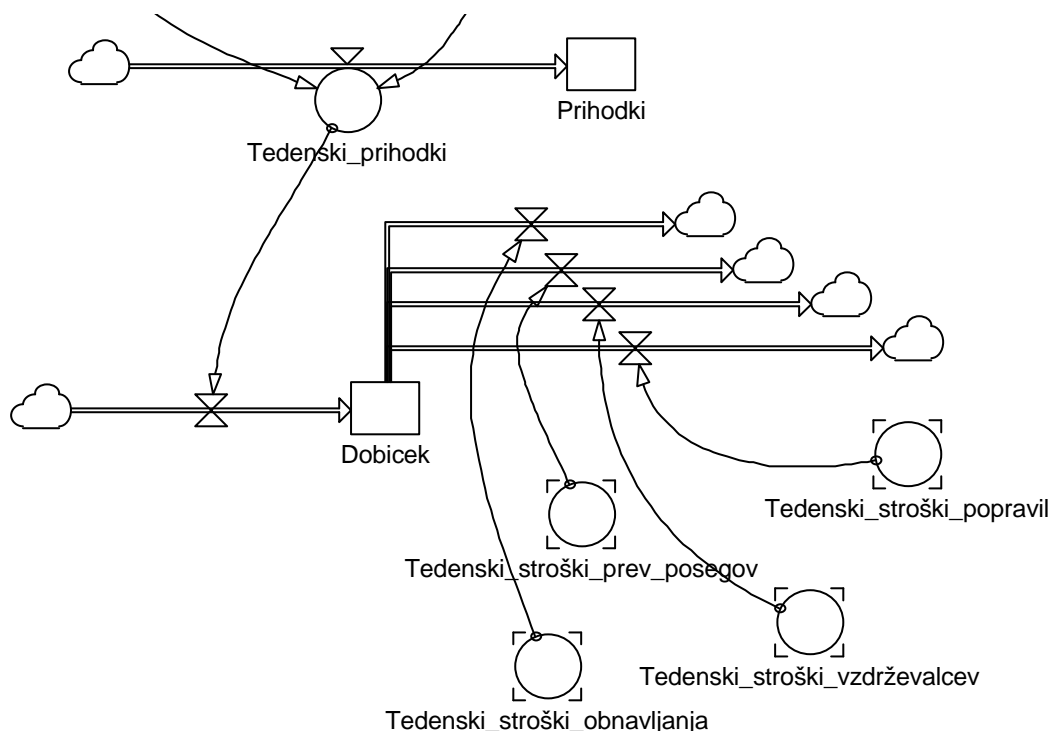
$$K_{povp} = K / (N + I) \quad (27)$$

Povprečna kapaciteta na zaposlenega je odvisna od skupne kapacitete in števila vseh zaposlenih. Tudi tu lahko z diagrami spremljamo posamezne zanimive parametre, kot so na primer povprečna kapaciteta, delež novincev, skupna kapaciteta, prosta kapaciteta.

### 5.2.5 Modul spremljanja prihodkov in odhodkov

Ta modul služi za sledenje prihodkom in odhodkom ter temu posledično dobička, ki nakaže, ali je posamezna strategija uspešna ali ne in katera strategija je primernejša od druge. V tem primeru nadgradimo model vzdrževanja letalskih motorjev (Varelis, 2002) še z upoštevanjem prihodkov. Model je poenostavljen prikaz realnosti, zato zajema le osnovne stroške. Namen modula prihodkov in odhodkov je, da je možno primerjati posamezne strategije med seboj in pri tem z obsežnostjo modela ostati v zmernih okvirih. Vse vrste stroškov vključimo v štiri osnovne vrste. Dobiček modeliramo kot nivo, prihodki so prtok, odtoki pa so odhodki. Modeliranje dobička prikazuje slika 14.

Slika 14: Modeliranje dobička



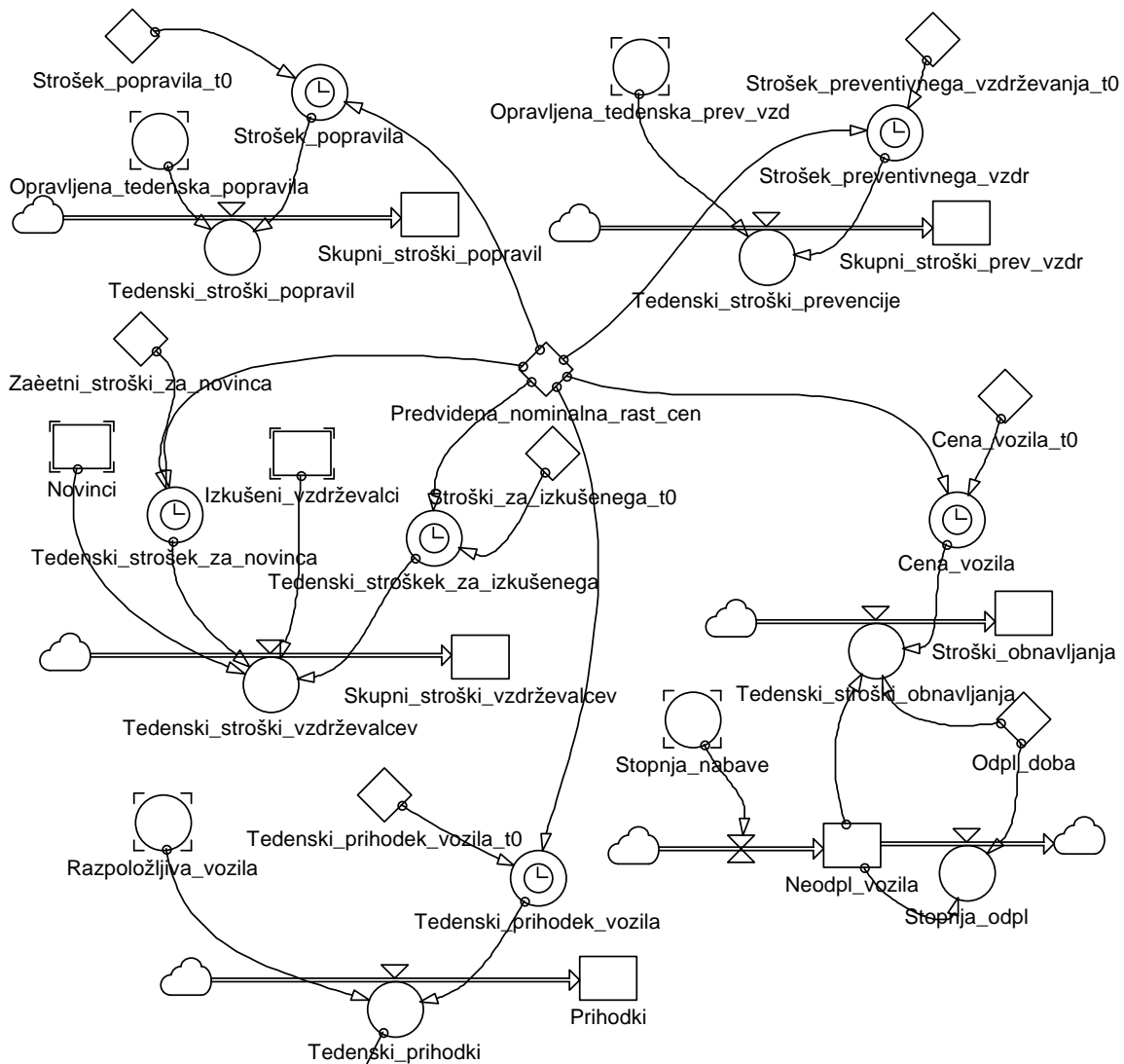
Vir: Prilagoditev modela Varelis (2002)

Iz slike 14 je razvidno, da je na eni strani prihodek, na drugi strani pa določimo štiri vrste odhodkov:

- stroški popravil,
- stroški preventivnih posegov,
- stroški obnovitev voznega parka,
- stroški vzdrževalcev.

Skupne prihodke in skupne odhodke po posameznih parametrih modeliramo tudi posebej. Skupne vrednosti modeliramo kot nivoje, tedenski prihodki in stroški pa so pritoki. To nam omogoča, da spremljamo posamezne skupine stroškov tako tedensko kot tudi skupne vrednosti stroškov. V modelu je omogočeno tudi upoštevanje nominalne rasti cen. Cel diagram je prikazan na sliki 15.

Slika 15: Spremljanje prihodka in odhodkov po posameznih skupinah



Vir: Prilagoditev modela Varelis (2002)



Slika 15 prikazuje način modeliranja posameznih tedenskih prihodkov in odhodkov po skupinah ter njihovo akumulacijo. S pomočjo časovne funkcije TIME pa vključimo v komponento cene posamezne aktivnosti tudi nominalno rast cen.

Stroški popravil in preventivnega vzdrževanja obsegajo materialne stroške, ki jih imamo s temi posegi, stroški vzdrževalcev predstavljajo plače, stroški obnovitev pa so odvisni od cene novih vozil. Dobiček izrazimo z enačbo:

$$D(t) = \int_{t_0}^t [\text{Pr} - C_p - C_{prev} - C_{obn} - C_{vzd}] dt + D_{t_0} \quad (28)$$

Kjer je:

- D - dobiček,
- $D_{t_0}$  - začetni dobiček,
- Pr - tedenski prihodki,
- $C_p$  - tedenski stroški popravil,
- $C_{prev}$  - tedenski stroški preventivnih posegov,
- $C_{obn}$  - tedenski stroški za obnovitve voznega parka,
- $C_{vzd}$  - tedenski stroški za vzdrževalce.

Skupni stroški popravil pa so:

$$C_{p\ tot}(t) = \int_{t_0}^t C_p dt + C_{p\ tot\ t_0} \quad (29)$$

Kjer je:

- $C_{p\ tot}$  - skupni stroški popravil,
- $C_{p\ tot\ t_0}$  - stroški popravil na začetku simulacije.

Tedenski stroški popravil so odvisni od števila tedenskih popravil in stroška za eno popravilo:

$$C_p = P * C_{p1} \quad (30)$$

Kjer je:

- P - tedensko število popravil,
- $C_{p1}$  - strošek enega popravila.

Strošek enega popravila pa je odvisen od začetne cene popravila ter s časom raste v skladu s predvideno nominalno rastjo cen:

$$C_{p1} = C_{p1\ t_0} [1 + \text{TIME} * (\text{nrc}/52)] \quad (31)$$

Kjer je:

- $C_{p1\ t_0}$  - strošek enega popravila v začetku izvajanja simulacije,
- nrc - nominalna rast cen.

Na podoben način so modelirani tudi ostali stroški. Posebno je le pri modeliranju stroškov obnovitev, kjer so tedenski stroški odvisni od dinamike obnavljanja (strategije, ki jo določimo) in cene vozila ter odplačilne dobe. Dinamika obnavljanja v kombinaciji z odplačilno dobo vpliva na število vozil, ki so še neizplačana. Tako modeliramo neizplačana vozila kot nivo, stopnja nabave, ki je odvisna od dinamike nabavljanja, je v tem primeru pritok, enako kot je pritok v populacijo voznega parka. Odtok pa je stopnja odplačevanja, ki je odvisna od odplačilne dobe. Enačba, ki določa stopnjo odplačevanja, je:

$$St_{odp} = V_n / T_{odp} \quad (32)$$

Kjer je:

- $St_{odp}$  - stopnja odplačevanja,
- $V_n$  - število vozil, ki še niso izplačana,
- $T_{odp}$  - odplačilna doba (tedni).

Odplačilno dobo vstavimo v tednih. Lahko izberemo kakršnokoli želimo. Poudariti pa je treba, da v primeru izbire daljše odplačilne dobe ob zaključku simulacije vsi stroški za nabavo vozil ne bodo v celoti izplačani. Zato bo dobiček nekoliko večji, kot bi sicer bil. To je lahko še posebej prisotno, če izberemo strategijo z večjo količino nabavljanja novih vozil. Zato je bolje, da izberemo krajše odplačilne dobe in tako dobimo bolj točne primerjave med posameznimi strategijami.

Izraz, ki predstavlja število neplačanih vozil, je:

$$V_n(t) = \int_{t_0}^t [St_{nab} - St_{pl}] dt + V_{nr0} \quad (33)$$

Število neplačanih vozil je tako odvisno od začetnega števila neplačanih vozil in se povečuje s stopnjo nabave ter manjša s stopnjo odplačevanja vozil.

Tako lahko dobimo tedenske stroške za obnovitve voznega parka z naslednjo enačbo:

$$C_{obn} = V_n * C_v / T_{odp} \quad (34)$$

Tu je:

- $C_v$  - cena enega vozila.

Tedenski stroški se akumulirajo v nivo skupnih stroškov za obnavljanje enako, kot je opisano za ostale primere stroškov.

Tudi v tem modulu lahko določimo posamezne parametre in jih spremljamo na diagramih, ki nam lahko služijo kot dodatno orodje za analizo strategij.

### 5.3 Dopolnitev modela za prilagajanje različnim spremembam zunanjega povpraševanja

Osnovni model je bil zgrajen ob predpostavki konstantnega števila vozil v voznem parku in pa predpostavki, da lahko uporabljamo vsa razpoložljiva vozila. Razmere na trgu pa se velikokrat spreminjajo, zato v model vpeljemo zunanje povpraševanje ter na ta način lahko preučujemo odzivanje sistema na različne spremembe zunanjega povpraševanja. Zunanje povpraševanje lahko modeliramo z različnimi funkcijami, ki jih imamo na voljo. Tako lahko uporabimo oblike funkcij, kot so:

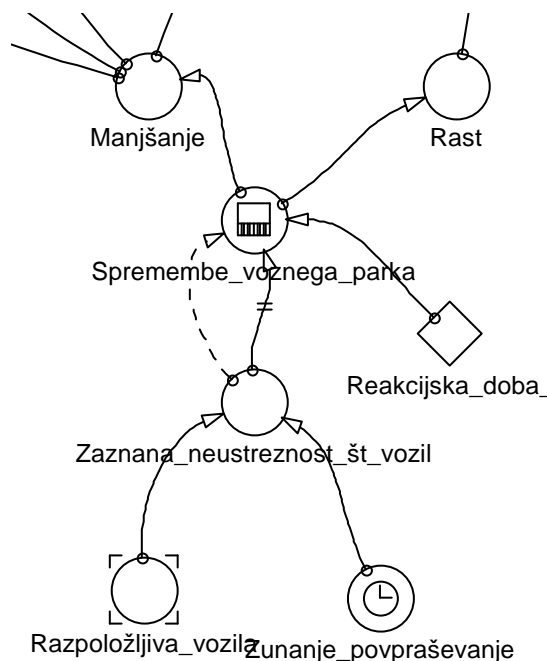
- konstantna linearna rast zunanjega povpraševanja,
- stopničasta rast zunanjega povpraševanja,
- oscilacije v zunanjem povpraševanju,
- ...

Vpeljava zunanjega povpraševanja omogoča analizo odzivanja sistema na zaznane spremembe v okolju. Na ta način lahko vidimo, kako se bo spreminjala izhodiščna strategija v odvisnosti od sprememb v okolju. Tako lahko analiziramo tudi vpliv odzivnega časa na prilagajanje spremembam.

V strategiji se odločamo o številu vozil v voznem parku, količini preventivnega vzdrževanja in zaposlovanju. Pri spremembah zunanjega povpraševanja se bo spreminjalo število vozil, ki jih od nas želijo odjemalci. Temu se mora prilagajati obseg voznega parka in število vzdrževalcev, zato je potrebno modelirati način odločanja, ki bo omogočal prilagajanje delovanja sistema na spremembe.

Način modeliranja odločitvenega procesa, ki vpliva na spremembe obsega voznega parka, je prikazan na sliki 16.

Slika 16: Modeliranje sprememb obsega voznega parka



Vir: Nadgradnja modela Alfred (2000)

Diagram vpliva prikazan na sliki 16, kaže, da se na osnovi razlike med zunanjim povpraševanjem in številom razpoložljivih vozil zazna neustreznost v številu vozil. Torej je izraz za zaznano neustreznost:

$$ZN = D_v - V_r \quad (35)$$

Kjer je:

ZN - zaznana neustreznost v številu vozil,

$V_r$  - število razpoložljivih vozil,

$D_v$  - zunanje povpraševanje po vozilih (št. vozil).

Zaznana neustreznost bo po določeni reakcijski dobi pripeljala do sprememb v obsegu voznega parka. Spremembe v obsegu voznega parku določimo s pomočjo funkcije informacijskega časovnega zamika DELAYINF:

$$S_{vp} = DELAYINF(ZN; Tr) \quad (36)$$

To pomeni, da so spremembe v voznem parku v času T posledice zaznane neustreznosti v času T-Tr, kar lahko zapišemo z naslednjo enačbo:

$$S_{vp}(T) = f[ZN(T - Tr)] \quad (37)$$

V enačbi (36) in enačbi (37) je:

$S_{vp}$  - sprememba obsega voznega parka,

Tr - reakcijska doba oziroma čas, ki je potreben, da se zgodijo spremembe.

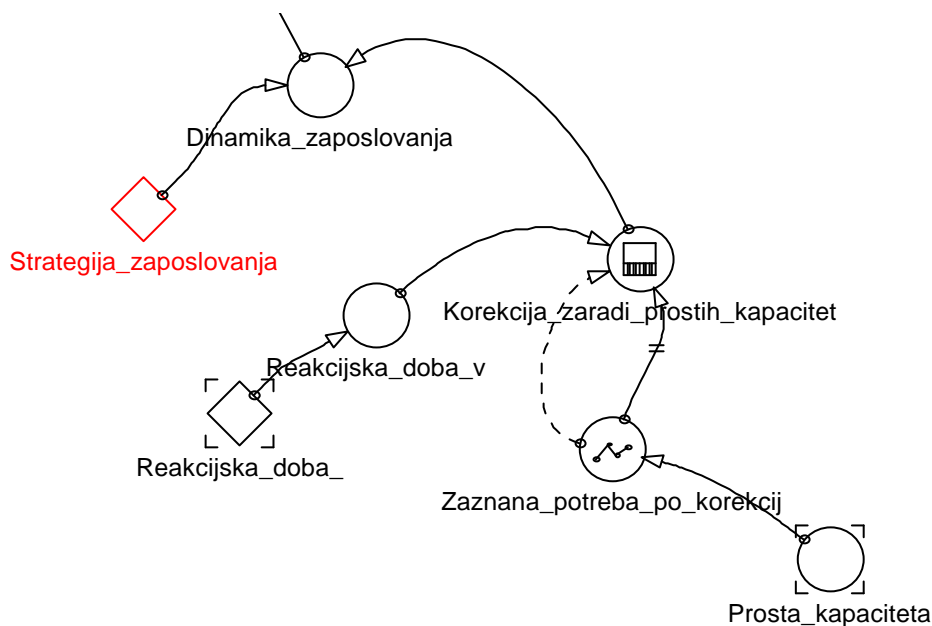
Sprememba obsega voznega parka bo vplivala na rast ali manjšanje voznega parka. Če bo vrednost pozitivna, se aktivira rast, če pa negativna, pa manjšanje. Spremenljivka „Rast,“ vpliva na stopnjo rasti voznega parka. To stopnjo določimo kot dodatno stopnjo stopnji obnavljanja in vpliva na večanje skupine novih vozil. Po drugi strani pa spremenljivka „Manjšanje,“ vpliva na stopnje zamenjav. Torej podjetje oziroma organizacija v tem primeru izloča iz voznega parka več vozil kot pa nabavi novih.

Potrebno je določiti še vpliv povpraševanja na strategijo zaposlovanja. Odločanje o korekcijah zaposlovanja modeliramo tako, da v primeru popolnoma zasedenih kapacitet poskušamo zaposliti enega dodatnega človeka letno. Ko je zaznana ena prosta kapaciteta, ne reagiramo, če je prostih kapacitet več, pa manjšamo količino zaposlovanja.

Reakcijska doba je ista kot pri spremembah v obsegu voznega parka, lahko pa se zaradi kakršnihkoli razlogov določi tudi drugače (drugačni postopki v različnih oddelkih).

Korekcije prostih kapacitet vplivajo na dinamiko zaposlovanja, ki je odvisna od predvidene strategije zaposlovanja. Korekcija večja ali manjša to vrednost. Modeliranje sprememb strategije zaposlovanja zaradi sprememb v zunanjem povpraševanju je prikazano na sliki 17.

Slika 17: Modeliranje sprememb strategije zaposlovanja



Vir: Nadgradnja modela Sterman (2000)

Iz slike 17 je razvidno, da korekcija prostih kapacitet nastane na osnovi zaznavanja potreb po korekciji kapacitet. Zaznane potrebe po korekciji kapacitete določimo s pomočjo funkcije GRAPH na osnovi prostih kapacitet.

$$ZPK = GRAPH(PK; K_1, K_2, \dots, K_n) \quad (38)$$

Tu pomeni:

- ZPK - zaznane potrebe po korekciji,
- PK - proste kapacitete,
- $K_i$  - predlagane korekcije glede na vrednosti prostih kapacitet.

Na osnovi zaznanih potreb po korekciji se izvede korekcija zaposlovanja. Odvisna je od reakcijske dobe in jo določimo podobno kot spremembe voznega parka:

$$KZ = DELAYINF(ZPK; Tr) \quad (39)$$

Kjer je:

- KZ - korekcija zaposlovanja,
- Tr - reakcijska doba oziroma čas, ki je potreben, da se zgodijo spremembe.

Tako kot v ostalih primerih, tudi te vrednosti lahko spremljamo na diagramih in grafih ter v tabelah.

## 5.4 Izgradnja simulacijskega vmesnika

Simulacijski vmesnik je potrebno zgraditi v splošnem zato, da model približamo vsem tistim, ki bi jih tak model lahko zanimal iz kakršnihkoli razlogov (poslovni, znanstveni, izobraževalni). Na ta način lahko preizkušajo posamezne strategije s pomočjo enostavnih posegov tudi tisti, ki so jim računalniška znanja tuja, kaj šele znanja matematike. S pomočjo simulatorja lahko dobijo izkušeni upravljavci nova znanja o sistemu, medtem ko se simulator lahko uporablja tudi da začetniki pridobijo prve izkušnje o določenem sistemu. Simulator se lahko razvije tudi na primer v simulacijsko igro, ki je namenjena izobraževanju in stimuliranju zaposlenih (Miragliotta in ostali, 2006, str. 217) . Ena najbolj znanih simulacijskih iger je tudi Beer Game, ki simulira logistično verigo in jo lahko igra vsak na internetu, kjer so tudi navodila (The Web Based Beer Game). V tej igri vsak igralec igra posamezno vlogo v logistični verigi. Simulatorji pa imajo lahko tudi pomembno vlogo kot dopolnilo študentom pri študiju strateškega managementa (Hsueh in ostali, 2006, str. 4).

Za namen lažjega dela z modelom vzdrževanja vozil naredimo tri vmesnike, ki omogočajo vstavljanje vrednosti v model ter spremljanje rezultatov simulacij. Prvi omogoča določitev voznega parka, drugi omogoča preučevanje različnih strategij ter spremljanje rezultatov, s pomočjo tretjega pa lahko spreminjamo stroškovne predpostavke. Okno za določitev voznega parka je prikazano na sliki 18.

Slika 18: Določitev obsega voznega parka

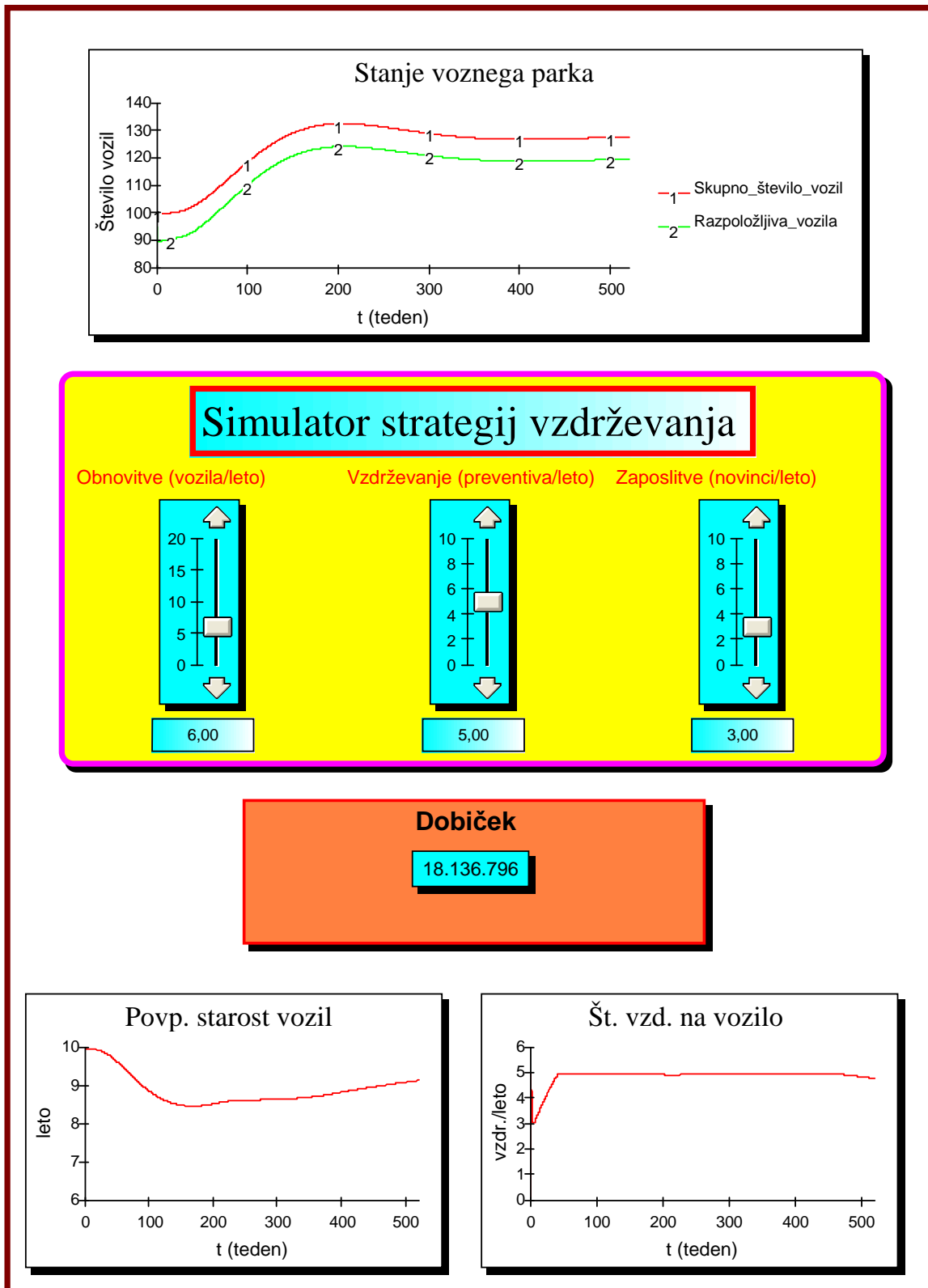
Vstavi stanje voznega parka		
Nova	10,00	Vozila stara do 5 let
Solidna	40,00	Vozila stara do 10 let
Stara	40,00	Vozila stara do 15 let
Najstarejša	10,00	Vozila stara nad 15 let

Vir: Simulacijski program

Slika 18 prikazuje vmesnik, ki omogoča vstaviti začetno stanje voznega parka. V polja vstavljamo količino vozil v posamezni skupini. Zraven v kvadratu je kratek opis posamezne skupine. Ko vstavimo vrednosti posameznih parametrov, lahko

preidemo na glavni uporabniški vmesnik, ki omogoča določanje strategij in spremljanje rezultatov simulacij. Prikazan je na sliki 19.

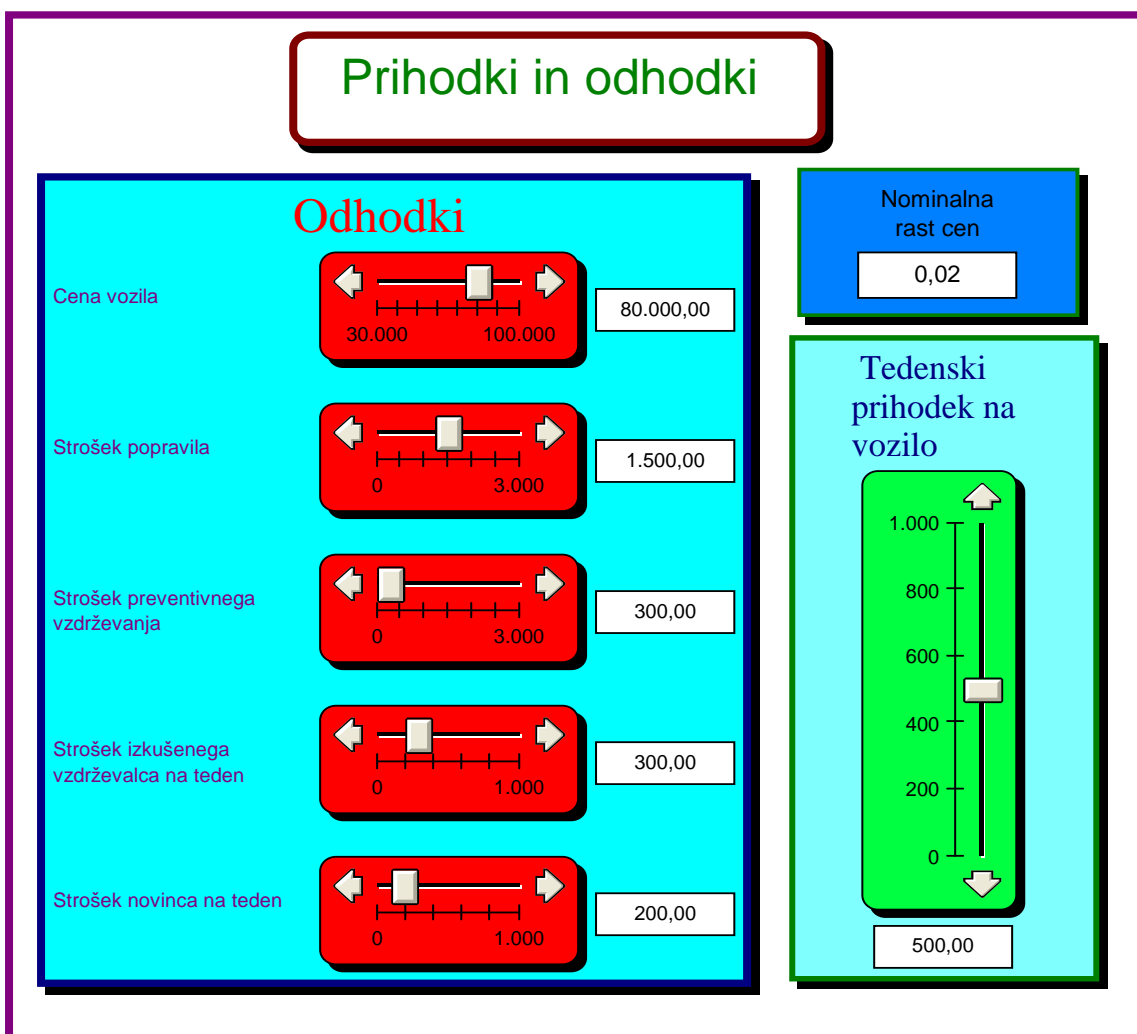
Slika 19: Vmesnik za določanje strategij



Vir: Simulacijski program

Na sliki 19 je vmesnik, s katerim lahko uporabnik določa strategije in spremlja obnašanje sistema ob določitvi posamezne strategije. V srednjem delu se vstavljajo parametri strategije. To je omogočeno na dva načina. Vrednost se lahko vstavi številčno, lahko pa se vstavi tudi s pomočjo drsnika, kar je hitreje. Okoli so diagrami, ki omogočajo spremljanje stanja sistema. Na vrhu lahko spremljamo stanje voznega parka. Krivulji v diagramu kažeta skupno število vozil in pa število razpoložljivih vozil. Spodaj lahko spremljamo številčno vrednost dobička. Potem pa sta še diagrama, ki prikazujeta povprečno starost vozil in pa število vzdrževanj na vozilo. Ostali podatki pa se lahko spremljajo še na dodatnih grafih. Dodamo pa še en vmesnik. Ta vmesnik pa omogoča, da se lahko izvajajo simulacije še ob spremenjenih stroškovnih predpostavkah. Prikazuje ga slika 20.

Slika 20: Vmesnik za spreminjanje stroškovnih predpostavk



Vir: Simulacijski program

Na sliki 20 je prikazan vmesnik za spreminjanje stroškovnih predpostavk. Na eni strani lahko spreminjamo strošek popravil, preventivnih posegov, predvidene cene vozil ter strošek za plače, na drugi strani pa lahko vstavljamo predviden prihodek, ki bi ga naj prinašalo posamezno vozilo. Upoštevamo lahko tudi nominalno rast cen. Na ta način je določen okvir, ki daje možnosti preizkušanja zelo različnih strategij za različne obsege voznih parkov ob številnih možnih predpostavkah.



## 6 Simulacije in analiza ter vrednotenje strategij

Ko je model določen in so zgrajeni tudi vmesniki, lahko preidemo na izvajanje simulacij. Izvajanje simulacij v simulatorju omogoča preučevanje posameznih strategij ob različnih predpostavkah in nakazuje možnosti uspeha posamezne strategije v realnem primeru. Simulirali bomo dve osnovni situaciji:

- simulacije pri konstantnem obsegu voznega parka,
- prilagajanje obsega voznega parka različnim spremembam zunanjega povpraševanja.

Pri analizi strategij pri konstantnem obsegu voznega parka primerjamo med seboj različne možne strategije, s katerimi lahko upravljamo vozni park. Nato primerjamo rezultate še pri podaljšanem času simulacije. Izvedemo tudi občutljivostno analizo, kjer proučujemo, kakšni so rezultati simulacij ob manjših spremembah parametrov od izbrane strategije. Izvedemo pa tudi analizo občutljivosti strategije na morebitna odstopanja pri stopnji okvar. Nato izvedemo še simulacije ob spremenjenih stroškovnih parametrih in preučujemo ali je v tem primeru morda boljše kakšna druga strategija. Izvedemo tudi simulacijo, kjer analiziramo odvisnost povprečne starosti vozil od strategije obnovitev.

V drugem delu izvedemo še simulacije, ko želimo prilagajati obseg voznega parka različnim možnim spremembam zunanjega povpraševanja, ki se lahko pojavijo. Tu je zanimivo predvsem analizirati, kakšno je prilagajanje voznega parka ob različnih reakcijskih dobah v podjetju.

Na koncu simulator še nadgradimo z modelom za večkriterijsko odločanje, ki omogoča izbiro najustreznejše strategije v primerih, ko dobiček ni edini kriterij.

### 6.1 Analiza strategij pri konstantnem obsegu voznega parka

Strategijo določimo z uskladitvijo treh odločitev v zvezi z obnovitvami voznega parka, želenim preventivnim vzdrževanjem in pa zaposlovanjem vzdrževalce. Odločitve v zvezi z vsemi tremi parametri razdelimo v tri osnovne skupine. Strategije lahko določamo skromno, zmerno ali pa pospešeno. Pregled odločitev je prikazan v tabeli 3.

Tabela 3: Odločitve v zvezi s strategijami

Odločitveni parametri			
Strategija	Obnavljanje (vozila/leto)	Preventivno vzdrževanje (posegi/leto)	Zaposlovanje (zaposlitve/leto)
Skromno	do 5	do 2	do 3
Zmerno	do 10	do 4	do 6
Pospešeno	nad 10	nad 4	nad 6

Vir: Lastna tabela

Tabela prikazuje, da obnavljanje do pet vozil letno štejemo za skromno, do deset zmerno in nad deset pospešeno. Podobno je iz tabele 3 razviden način odločanja tudi za ostale tri parametre. S kombiniranjem teh treh strategij dobimo 27 variant in tako izvedemo simulacije za vse možne strategije. Za izvajanje simulacij vzamemo vozni park, ki ima v začetnem stanju 10 vozil novih, 40 jih je v skupini solidnih, 40 v skupini starejših in 10 v skupini najstarejših. Rezultati so prikazani v tabeli 4.

Tabela 4: Simulacije pri voznem parku s konstantnim obsegom

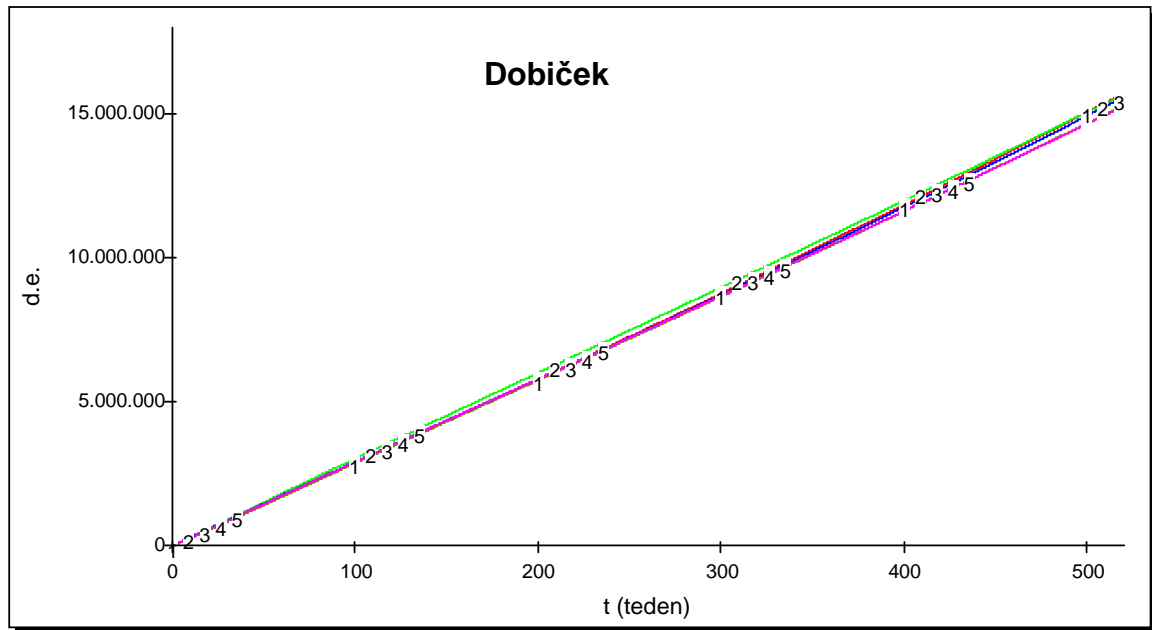
Simulacije- konstantni obseg voznega parka							
Varianta	Parametri			Dobiček (d.e.)	Razpoložljivost (št. vozil)	Povp. starost (leto)	Primernost
	Obnovitve (voz./leto)	Prev. vzd. (posegi/leto)	Zaposlitve (zap./leto)				
1	3	2	3	10.956.659,00	45	12,46	<b>24</b>
2	4	2	5	15.707.898,00	92	11,43	<b>2</b>
3	4	2	9	14.700.395,00	92	11,43	<b>8</b>
4	4	3	3	12.795.485,00	51	11,43	<b>18</b>
5	5	4	6	15.301.469,00	93	10,41	<b>5</b>
6	4	3	8	15.081.127,00	92	11,43	<b>6</b>
7	4	5	3	13.967.428,00	51	11,43	<b>12</b>
8	5	6	6	15.322.173,00	93	10,41	<b>4</b>
9	4	7	8	14.913.697,00	92	11,43	<b>7</b>
10	9	2	3	14.342.980,00	96	6,95	<b>10</b>
11	8	2	5	14.380.875,00	95	7,59	<b>9</b>
12	7	2	9	13.756.024,00	95	8,35	<b>14</b>
13	6	3	3	15.641.220,00	94	9,38	<b>3</b>
14	8	4	6	14.026.234,00	95	7,59	<b>11</b>
15	8	3	8	13.575.448,00	95	7,59	<b>15</b>
16	6	5	3	15.748.050,00	94	9,38	<b>1</b>
17	8	6	6	13.809.302,00	94	7,59	<b>13</b>
18	8	7	8	12.878.047,00	93	7,59	<b>17</b>
19	11	2	3	13.201.840,00	96	5,68	<b>16</b>
20	12	2	5	12.107.079,00	96	5,32	<b>19</b>
21	14	2	8	10.061.449,00	96	4,80	<b>25</b>
22	13	3	3	11.822.909,00	96	5,06	<b>20</b>
23	12	4	6	11.572.503,00	95	5,32	<b>21</b>
24	14	3	9	9.639.193,00	96	4,80	<b>26</b>
25	13	5	3	11.542.601,00	95	5,06	<b>22</b>
26	12	6	6	11.195.834,00	95	5,32	<b>23</b>
27	14	7	9	8.587.902,00	94	4,80	<b>27</b>

Vir: Lastna simulacija

Tabela 4 prikazuje rezultate izvajanja simulacij. V prvem stolpcu je označena varianta, v naslednjih treh stolpcih so odločitveni parametri, nato pa sledijo rezultati po končanih simulacijah. Simulacije izvedemo za obdobje 520 tednov, torej 10 let. Stolpci rezultatov prikazujejo dobiček, razpoložljivost vozil in pa povprečno starost voznega parka ob koncu simuliranega obdobja. Glede na dobiček je najugodnejša varianta 16, ko obnovimo 6 vozil letno, načrtovano vzdrževanje je 5 posegov letno, zaposluje pa tri nove delavce letno. Med najboljšimi petimi variantami vidimo,

da so vrednosti obnovitev med 5 in 6 letno, torej skromno do zmerno, količine preventivnih posegov so bolj v razredu zmerno do pospešeno (ena tudi skromno), zaposlovanje pa je tudi predvsem v razredu zmerno. Primerjavo dobička najboljših petih variant prikazuje diagram na sliki 21.

Slika 21: Strategije z največjim dobičkom



Vir: Lastna simulacija

Poleg diagrama dobička na sliki 21 so diagrami števila razpoložljivih vozil, povprečne starosti in pa spremljanja povprečnega vzdrževanja v prilogi 2. Pri vseh petih variantah dobiček raste na približno enak način in iz samega diagrama se vidi, da so variante približno enako ugodne. Pri najboljši varianti povprečna starost rahlo pada, pri drugi najboljši pa nekoliko raste. Pri številu razpoložljivih vozil je najboljša tretja varianta, pri najboljši varianti število razpoložljivih vozil ves čas raste in kaže boljši trend kot pri tretji varianti. Pri vseh variantah se načrt izpolnjevanja preventivnih aktivnosti uspešno izpolnjuje. Vidi se, da ima le najboljša varianta težave z izpolnjevanjem načrta preventivnega vzdrževanja proti izteku simulacijskega časa. Prva in tretja varianta imata majhno število letnih zaposlovanj. Razlikujeta pa se samo pri načrtovanem številu preventivnih vzdrževanj. Prva varianta ima predvideno število preventivnih vzdrževanj pet, tretja pa le tri. Zaradi tega je razvidno iz diagrama razpoložljivosti, da je pri prvi varianti v začetni fazi krivulja razpoložljivosti nekoliko nižja od tretje variante, potem pa začne rasti in dohiti krivuljo razpoložljivosti tretje variante, kar nakazuje, da je večje vzdrževanje znižalo stopnjo okvar ter tako lahko ob večjem vzdrževanju dosežemo enako razpoložljivost in boljši finančni rezultat. Kljub temu pa razlika v dobičku ni takšna, da bi lahko z gotovostjo trdili, da je prva varianta boljša od preostalih. Vendar pa varianta z več vzdrževanja omogoča boljše možnosti načrtovanja storitev, saj je poudarek na načrtovanih postankih namesto na nepredvidenih, ki posledično povzročajo motnje pri izvajanju storitev in vplivajo hkrati na nezadovoljstvo strank in tudi nezadovoljstvo pri delavcih v podjetju zaradi nenačrtovanih opravil.

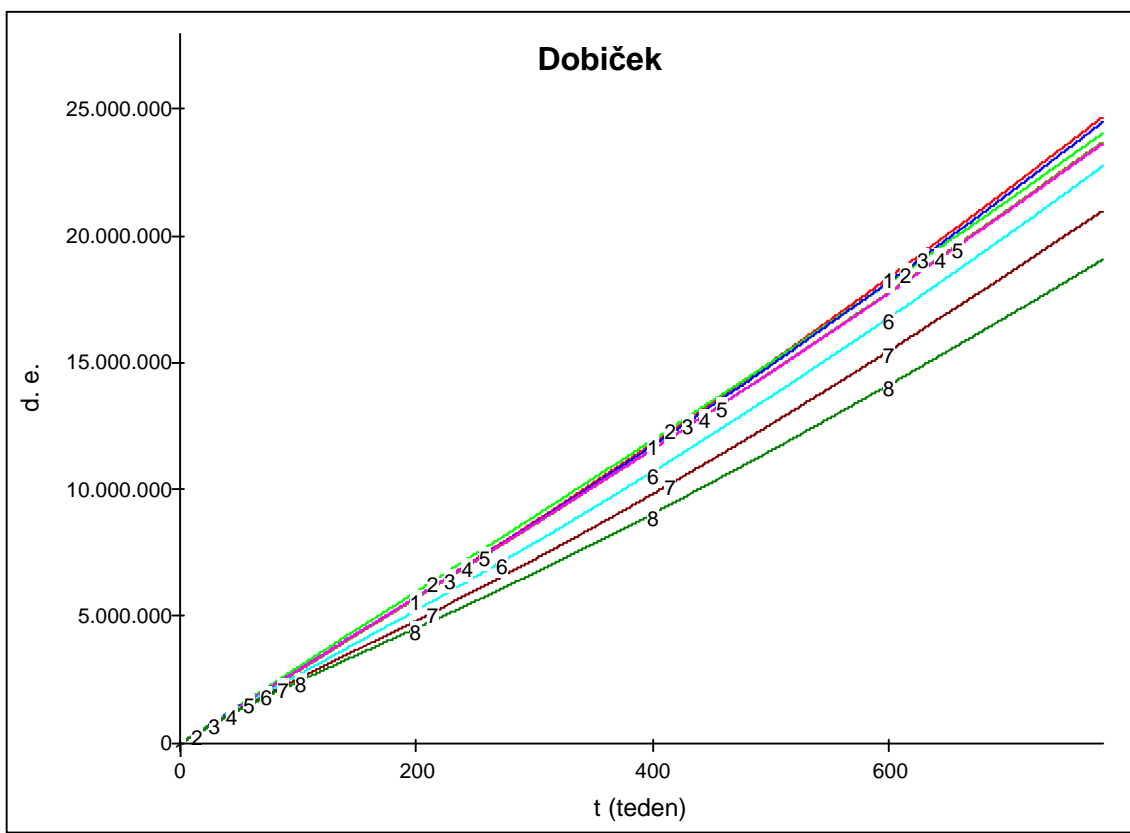
Simulacije kažejo tudi, da variante s pospešenim obnavljanjem voznega parka občutno povečajo razpoložljivost, prav tako pa je povprečna starost voznega parka

precej nižja. Te variante pa finančno niso najboljše, razlog so večji stroški obnavljanja vozil. V naslednji fazi preverimo, ali se te strategije bolje obnesejo na daljši rok, torej če podaljšamo čas simulacije.

### 6.1.1 Analiza pri podaljšanem času simulacije

V tem primeru podaljšamo čas simulacije na 780 tednov in najboljših pet variant primerjamo s tremi iz skupine, ki dosegajo razpoložljivost 96 vozil. Simulacije so prikazane na sliki 22.

Slika 22: Dobiček pri podaljšanem času simulacij



Vir: Lastna simulacija

Poleg prikaza dobička na sliki 22 so ostali parametri prikazani v prilogi 3. Najboljšim petim variantam so dodane še tri variante, ki dosegajo najvišjo razpoložljivost in so označene s števili 6, 7 in 8. Pri vseh petih najboljših variantah se nadaljuje isti trend. Iz priloge 3 pa je razvidno, da imajo variante s pospešenim obnavljanjem voznega parka prav tako še naprej precej boljšo razpoložljivost, imajo pa tudi veliko nižjo povprečno starost voznega parka. Vendar pa glede na dobiček še vedno zaostajajo za najboljšimi petimi variantami. Zato najboljše variante ostanejo enake.

## 6.2 Občutljivostna analiza

Občutljivostno analizo izvedemo z dveh vidikov. Zanima nas, kako se spreminjajo rezultati simulacije, če spremenimo odločitvene parametre okoli najboljše variante. Zanima nas tudi, kako trdna je izbrana varianta v primeru, če je delež okvar na vozilo drugačen od predvidenega.

### 6.2.1 Občutljivostna analiza spremembe parametrov

V tem primeru izvedemo simulacije tako, da spremenimo vsak parameter izbrane najboljše odločitve za eno enoto v plus in minus. Najboljša simulirana varianta je imela vrednost obnavljanja šest vozil letno, zelenih preventivnih posegov je bilo pet letno in predvidevane so tri letne zaposlitve. Rezultate simulacije prikazuje tabela 5.

Tabela 5: Občutljivostna analiza spremembe parametrov

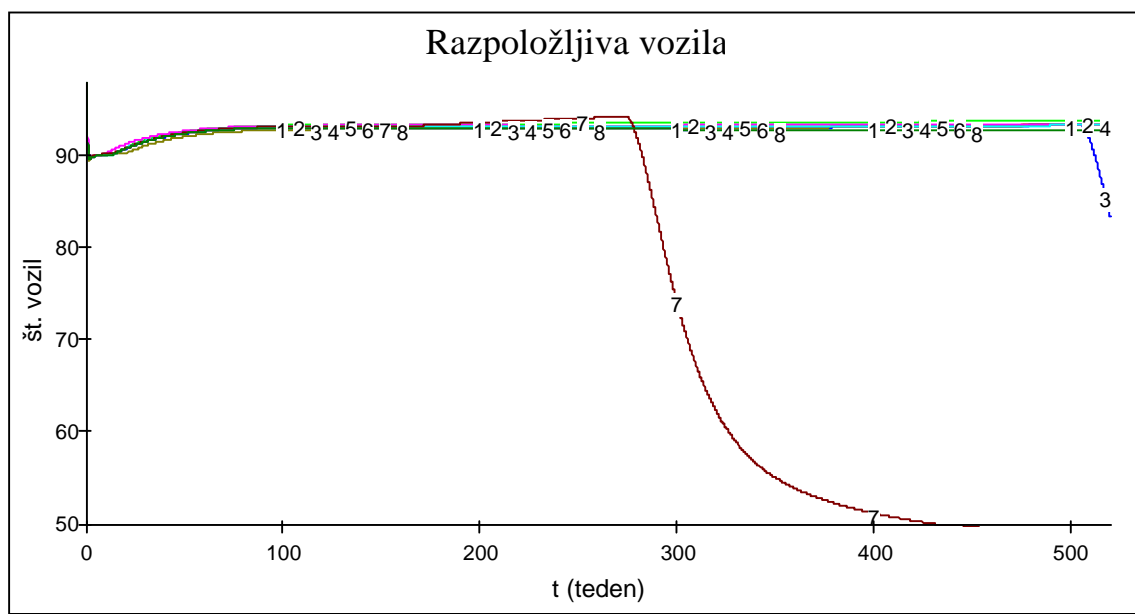
Simulacije - občutljivostna analiza, sprememba parametrov						
Varianta	Parametri			Dobiček (d.e.)	Razpoložljivost (št. vozil)	Povp. starost (leto)
	Obnovitve (voz./leto)	Prev. vzd. (posegi/leto)	Zaposlitve (zap./leto)			
1	6	5	3	15.748.050,00	94	9,38
2	7	5	3	15.289.385,00	94	8,35
3	5	5	3	16.151.097,00	84	10,41
4	6	6	3	15.642.921,00	94	9,38
5	6	4	3	15.649.611,00	94	9,38
6	6	5	4	15.494.729,00	94	9,38
7	6	5	2	10.954.729,00	48	9,38
8	5	5	4	15.954.409,00	93	10,41

Vir: Lastna simulacija

Tabela 5 prikazuje simulacije, ki se izvedejo pri občutljivostni analizi spremembe parametrov. Vrednosti posameznih parametrov se spreminjajo za eno enoto več ali manj ter na ta način izvedemo sedem simulacij. Izvedemo še dodatno osmo simulacijo, pri kateri spremenimo dva parametra. Strategija 3, ki predvideva nabavo enega vozila letno manj, se izkaže za ugodnejšo glede na dobiček, vendar pa ne uspe zadržati visoke razpoložljivosti. Zato izvedemo še osmo simulacijo, kjer povečamo zaposlovanje za eno enoto. Tej varianti uspe zadržati tudi visoko razpoložljivost in ima višji dobiček kot izhodiščna varianta.

Na sliki 23 diagram prikazuje število razpoložljivih vozil. Vidimo, da število razpoložljivih vozil pri tretji varianti, ki ima najboljši dobiček, proti koncu simulacijskega obdobja pade. Pri zadnji varianti, ki ima eno zaposlitev na leto več, ostane število razpoložljivih vozil visoko. Prav tako pa simuliran rezultat dobička ni toliko manjši, da bi lahko trdili, da je osma varianta slabša.

Slika 23: Simulacije števila razpoložljivih vozil pri občutljivostni analizi



Vir: Lastna simulacija

Poleg diagrama na sliki 23 vsebuje priloga 4 tudi diagram dobička in pa diagram, ki prikazuje preventivno vzdrževanje. Tretja varianta že po sredini simulacijskega obdobja ne more več izpolnjevati nalog preventivnega vzdrževanja. Vzrok je v manjšem obnavljanju voznega parka, kar poveča stopnjo okvar. Tudi izhodiščna varianta ne more izpolnjevati načrta preventivnega vzdrževanja, vendar šele proti koncu simuliranega obdobja. Osmo varianta je sposobna izpolnjevati naloge preventivnega vzdrževanja skozi vso simulirano obdobje. Zaključek je, da lahko izboljšamo rezultat dobička, če zmanjšamo obnovitve, vendar je v tem primeru potrebno povečati letno zaposlovanje, če želimo imeti sistem stabilen. Ob tem primeru pa je potrebno upoštevati tudi to, da se povprečna starost voznega parka nekoliko poveča.

## 6.2.2 Občutljivostna analiza deleža okvar

V tem delu izvedemo analizo tako, da spreminjamo parameter deleža okvar (okvare/vozilo/leto). Zanima nas, kaj se zgodi, če smo se zmotili v predvidevanjih o deležu okvar, ki se pojavlja pri vozilih. V zvezi s tem je zanimiv podatek, za koliko se lahko zmotimo pri predvidevanjih o deležu okvar, da bo sistem še vedno ostal stabilen v okvirih, ki smo jih določili. Zanima nas ali bodo kriteriji dobiček, razpoložljivo število vozil, izpolnjevanje načrta preventivnega vzdrževanja glede na drugačno stopnjo okvar ostali v podobnih okvirih, oziroma kdaj to ne bo več uspevalo. Za izhodišče vzamemo varianto, ki se je pri občutljivostni analizi izkazala za boljšo. To je pet obnovitev letno, pet preventivnih vzdrževanj letno in pa štiri letne zaposlitve novincev. Izvedba simulacije je prikazana s tabelo 6.

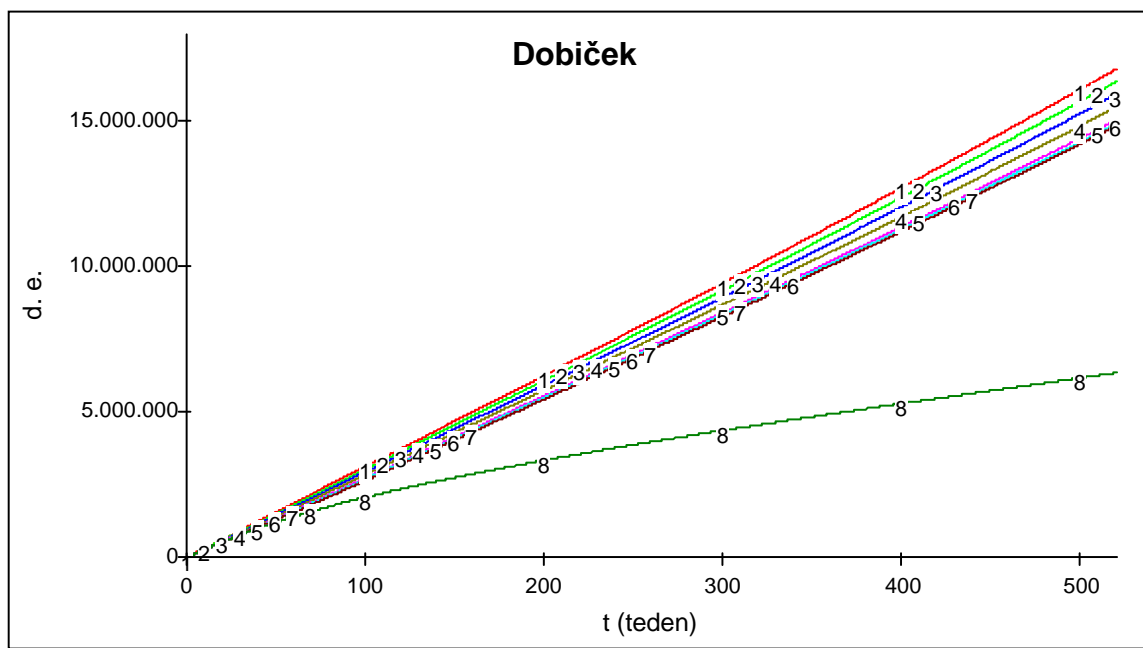
Tabela 6: Občutljivostna analiza deleža okvar

Simulacije - občutljivostna analiza, delež okvar			
Varianta	Korekcijski faktor	Dobiček (d.e.)	Razpoložljivost (št. vozil)
1	0,8	16.824.272,00	94
2	0,9	16.388.505,00	93
3	1	15.954.409,00	93
4	1,1	15.519.331,00	93
5	1,2	15.062.499,00	92
6	1,22	14.950.304,00	92
7	1,23	14.868.826,00	92
8	1,24	6.377.155,00	61

Vir: Lastna simulacija

V tabeli 6 so prikazane simulacije, ki jih izvedemo, da ugotovimo, kako je rezultat občutljiv na spremembo deleža okvar vozil. Pričakovano je rezultat pri korekcijskem faktorju manjšem od 1 nekoliko boljši tako pri razpoložljivosti kot pri dobičku. Pri korekcijskem faktorju večjem od 1 pa se dobiček in razpoložljivo število vozil manjša. Občutno pa dobiček in razpoložljivost padeta šele pri faktorju 1,24. Torej se pri napovedi o deležu okvar lahko zmotimo za 23 %, pa bo sistem pri dani strategiji še vedno ostal stabilen. Rezultati simulacije glede na dobiček so prikazani tudi na sliki 24.

Slika 24: Dobiček pri občutljivostni analizi deleža okvar



Vir: Lastna simulacija

Poleg dobička na sliki 24 so v prilogi 5 prikazani še diagrami izpolnjevanja načrta preventivnega vzdrževanja, stopnja okvar vozil in izkoristek vzdrževalcev.

Na vseh diagramih občutno odstopa osma varianta, ko sistem več ne deluje v normalnih okvirih. Do takrat uspevamo v vseh variantah izpolnjevati načrt vzdrževalnih nalog. Vidimo, da je stopnja okvar pri nižjem korekcijskem faktorju nižja, ko pa korekcijski faktor raste, se poveča tudi stopnja okvar. Enako velja za izkoristek vzdrževalcev, ki pa doseže vrednost 1 šele pri zadnji varianti. Do takrat je vedno nekaj rezerve pri vzdrževalcih.

### 6.3 Analiza stopnje okvar

Stopnja okvar vozil je parameter, ki najbolj vpliva na obremenjenost vzdrževalcev in pa samo razpoložljivost vozil. Obnovitve voznega parka in preventivna vzdrževanja pa stopnjo okvar manjšajo. V ta namen primerjamo povprečno starost vozil, posege preventivnega vzdrževanja in stopnjo okvar vozil. Primerjamo parametre petih strategij, ki so prikazale najboljši dobiček, poleg teh pa dodamo še dve strategiji, ki sta dali pri simulaciji slabši dobiček, sta pa najboljše na področju parametra razpoložljivosti vozil. Primerjava je podana na sliki 25.

Legenda na sliki 25 prikazuje:

- O - obnovitve,
- P - preventivno vzdrževanje,
- Z - zaposlitve.

Številke predstavljajo vrednosti teh parametrov na letni ravni. Če primerjamo strategiji 1 in 2, ki sta imeli najboljši dobiček, vidimo, da je stopnja okvar pri prvi strategiji manjša. Posledica prve strategije v primerjavi z drugo je manjša povprečna starost in pa večje število preventivnih posegov. Zato ima prva strategija nižjo stopnjo okvar in hkrati tudi ustaljeno, pri drugi pa se vidi, da poleg tega, da je višja v primerjavi s prvo, se ta razlika še večja in stopnja okvar po tem, ko se zmanjša zaradi vzdrževanja, zopet začne nekoliko rasti.

Pri drugi strategiji je stopnja okvar pravzaprav najvišja med vsemi. To je posledica nizkega števila preventivnih posegov in pa najvišje povprečne starosti, ki jo povzroči ta strategija.

Tretja strategija je glede na stopnjo okvar med prvo in drugo. Stopnja okvar je višja kot pri prvi, kljub temu da doseže nižjo povprečno starost vozil. Zato ta strategija vsebuje manj preventivnega vzdrževanja glede na prvo in posledica je višja stopnja okvar.

Četrta strategija povzroči podobno stopnjo okvar kot prva, je pa nekoliko nižja. Obe strategiji povzročita enako povprečno starost vozil. Četrta strategija ima en vzdrževalni poseg letno več, zato je stopnja okvar nižja.

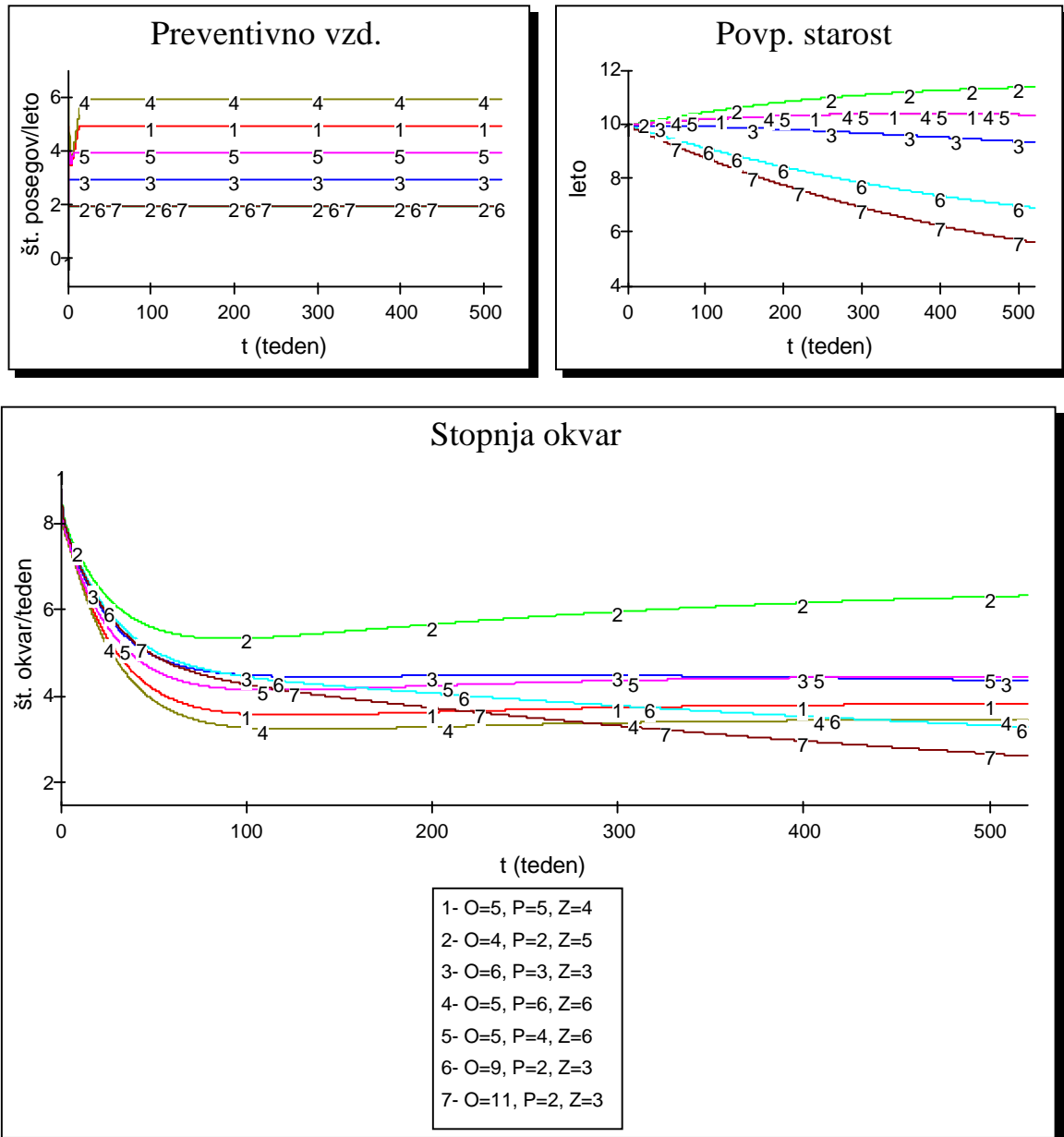
Peta strategija je najbolj podobna tretji glede na stopnjo okvar. Pri peti strategiji je povprečna starost višja kot pri tretji. Število letnih vzdrževalnih posegov je tudi večje, zato vzdrževalni posegi najprej krivuljo pete strategije znižajo glede na tretjo, s časom pa kot posledica večje povprečne starosti stopnja okvar pete strategije zraste nad tretjo strategijo.

Šesta in sedma strategija sta zasnovani na pospešenem obnavljanju voznega parka, zato povzročita precej nižjo povprečno starost vozil. Dosežeta tudi nižjo stopnjo okvar. V tem primeru pa na nižjo stopnjo okvar vpliva predvsem povprečna starost oziroma večje število vozil v mlajših starostnih skupinah. Obe strategiji



imata sicer enako nizko raven preventivnih vzdrževalnih posegov. Sedma strategija ima nižjo stopnjo okvar glede na šesto, in sicer zaradi nižje povprečne starosti vozil.

Slika 25: Primerjava stopnje okvar vozil



Vir: Lastna simulacija

## 6.4 Analiza pri spremembi stroškov nabave vozil

V tem primeru predpostavimo, da se stroški za nabavo vozil zmanjšajo. Cena vozil se zmanjša z 80.000 na 60.000. Upoštevati pa moramo, da vozila z nižjo ceno povzročajo več okvar. Zanima nas, ali bodo v tem primeru strategije s pospešenim obnavljanjem dobile prednost pred strategijami z zmernim

obnavljanjem. Novo vrednost vstavimo v vmesnik za določanje stroškov in izvedemo novo serijo simulacij. Rezultati simulacij so prikazani v tabeli 7.

Tabela 7: Simulacije pri nižjih cenah vozil

Simulacije - nižja cena vozil							
Varianta	Parametri			Dobiček (d.e.)	Razpoložljivost (št. vozil)	Povp. starost (leto)	Primernost
	Obnovitve (voz./leto)	Prev. vzd. (posegi/leto)	Zaposlitve (zap./leto)				
1	3	2	3	9.895.123,00	41	12,46	<b>27</b>
2	4	2	5	15.996.023,00	92	11,43	<b>4</b>
3	4	2	9	14.988.520,00	92	11,43	<b>13</b>
4	4	3	3	11.604.995,00	47	11,43	<b>25</b>
5	5	4	6	15.906.539,00	93	10,41	<b>5</b>
6	4	3	8	15.414.279,00	92	11,43	<b>8</b>
7	4	5	3	12.764.988,00	47	11,43	<b>22</b>
8	5	6	6	16.002.089,00	92	10,41	<b>3</b>
9	4	7	8	15.382.970,00	91	11,43	<b>9</b>
10	9	2	3	15.780.834,00	95	6,95	<b>6</b>
11	8	2	5	15.600.373,00	95	7,59	<b>7</b>
12	7	2	9	14.745.736,00	94	8,35	<b>15</b>
13	6	3	3	16.417.008,00	93	9,38	<b>2</b>
14	8	4	6	15.313.170,00	94	7,59	<b>10</b>
15	8	3	8	14.828.710,00	95	7,59	<b>14</b>
16	6	5	3	16.626.150,00	93	9,38	<b>1</b>
17	8	6	6	15.154.756,00	94	7,59	<b>11</b>
18	8	7	8	14.232.615,00	93	7,59	<b>16</b>
19	11	2	3	15.072.535,00	96	5,68	<b>12</b>
20	12	2	5	14.192.798,00	96	5,32	<b>17</b>
21	14	2	8	12.569.243,00	96	4,80	<b>23</b>
22	13	3	3	14.147.021,00	96	5,06	<b>18</b>
23	12	4	6	13.712.865,00	95	5,32	<b>20</b>
24	14	3	9	12.172.525,00	96	4,80	<b>24</b>
25	13	5	3	13.920.235,00	95	5,06	<b>19</b>
26	12	6	6	13.384.368,00	94	5,32	<b>21</b>
27	14	7	9	11.197.724,00	94	4,80	<b>26</b>

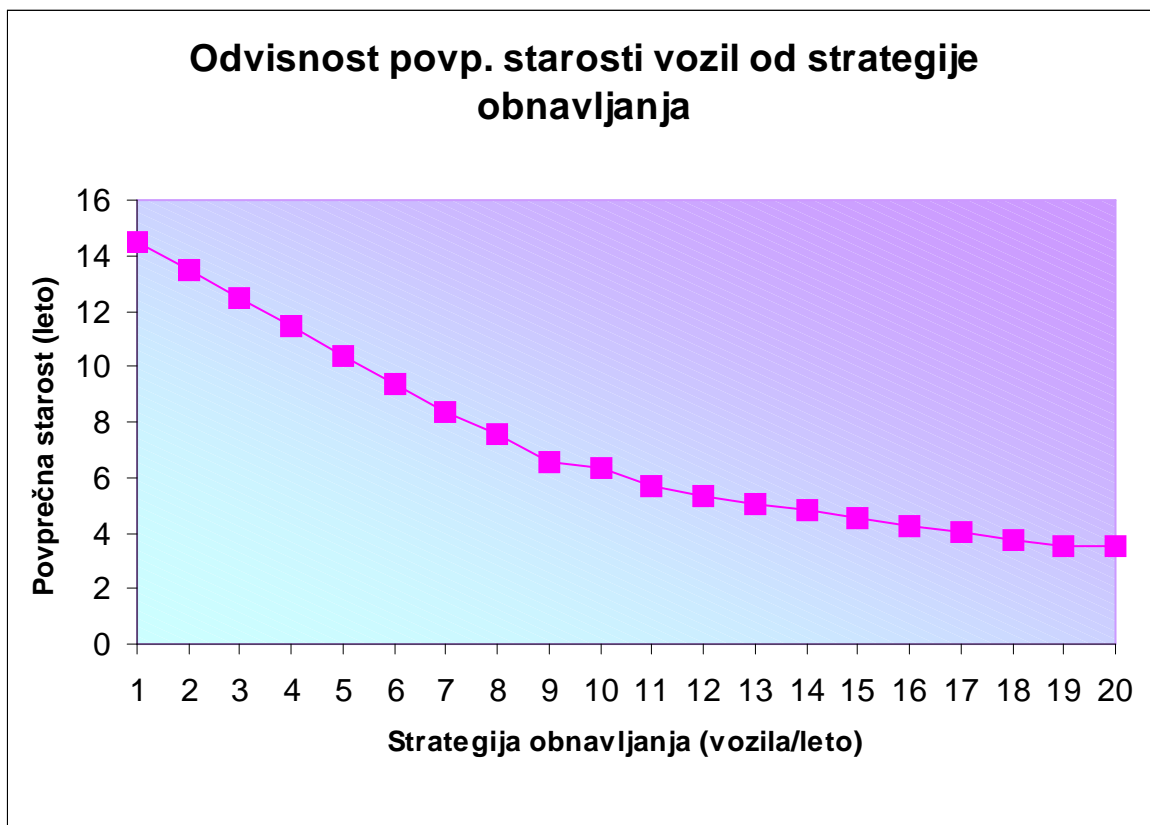
Vir: Lastna simulacija

Iz tabele 7 je razvidno, da najboljše strategije ostajajo nespremenjene, torej strategije z boljšo razpoložljivostjo (strategija 19) še vedno niso tako ugodne glede na dobiček, čeprav je razlika nekoliko manjša. Lahko ugotovimo, da takšna sprememba cen vozil bistveno ne spremeni strategij. V povprečju prikažejo rezultati simulacij pri obnovitvah s cenejšimi vozili višji dobiček. Posledica voznega parka cenejših vozil pa je nižja razpoložljivost, kar je prav tako razvidno iz rezultatov simulacij.

## 6.5 Analiza odvisnosti povprečne starosti vozil od strategije obnovitev

Pri analizah lahko uporabljamo tudi posamezne module. V tem primeru lahko analiziramo, kako vpliva strategija obnavljanja voznega parka na povprečno starost voznega parka. Preizkusimo različne strategije in primerjamo, kako bodo te strategije vplivale na povprečno starost voznega parka ob koncu simulacijskega časa. Rezultati so prikazani na sliki 26.

Slika 26: Odvisnost povprečne starosti vozil od strategije obnavljanja



Vir: Lastna simulacija

Na sliki 26 so prikazane povprečne starosti vozil v voznem parku ob koncu simulacijskega obdobja. Po pričakovanju vidimo, da z bolj agresivno strategijo obnavljanja povprečna starost vozil pada. Z enačbo (40) izračunamo, kakšen je korelacijski koeficient med strategijo obnavljanja in povprečno starostjo:

$$\rho = \frac{C_{xy}}{\sqrt{\sigma_x^2 * \sigma_y^2}} \quad (40)$$

Kjer je:

$C_{xy}$  - kovarianca,

$\sigma_x^2, \sigma_y^2$  - varianca.

Če vstavimo vrednosti, ki so izračunane v prilogi 6, dobimo:

$$\rho = -0,9545$$

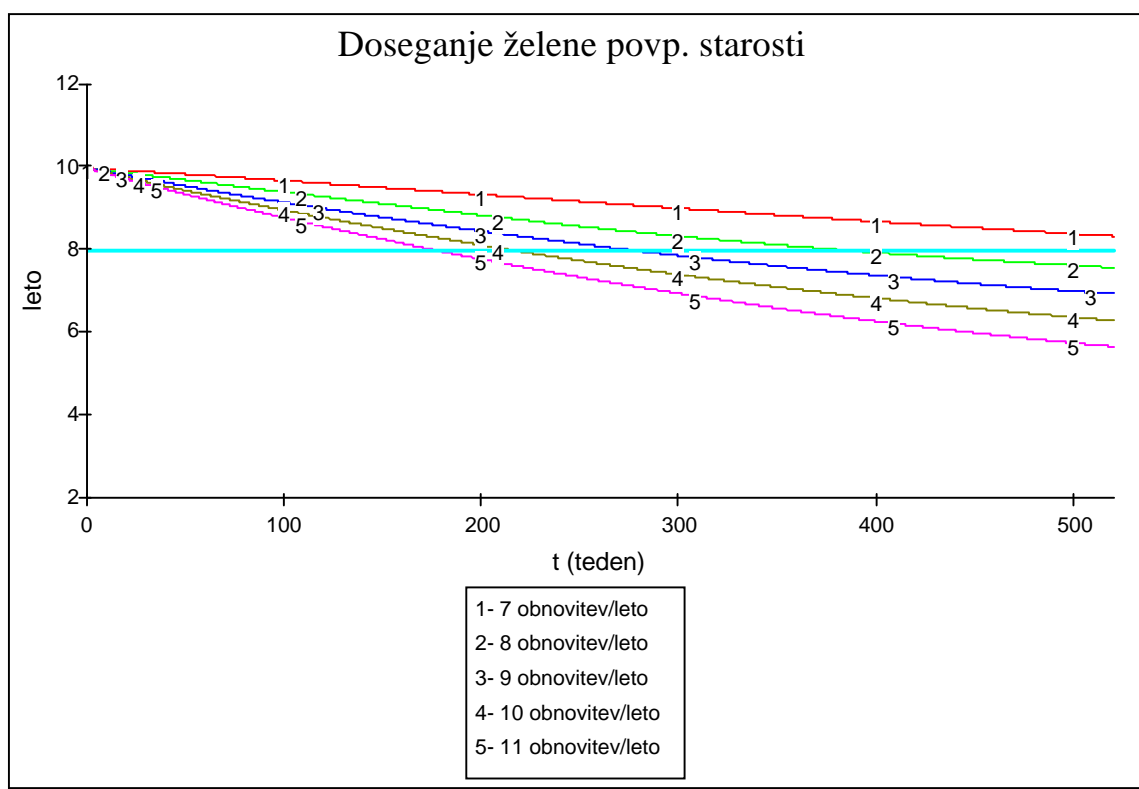
Izračunamo še determinacijski koeficient:

$$D = \rho^2 \quad (41)$$

Vrednost D je 0,9110, kar pomeni, da ima strategija obnovitev 91 % vpliva na povprečno starost vozil. Preostali delež vpliva je odvisen od začetnega stanja voznega parka.

S simulacijami pa lahko analiziramo tudi čas, v katerem povprečna starost vozil doseže določeno vrednost. Simulacije analize, v kateri želimo izvedeti, kdaj se povprečna starost vozil zmanjša za dve leti (z 10 na 8 let), je prikazana na sliki 27.

Slika 27: Čas potreben za zmanjšanje povprečne starosti vozil



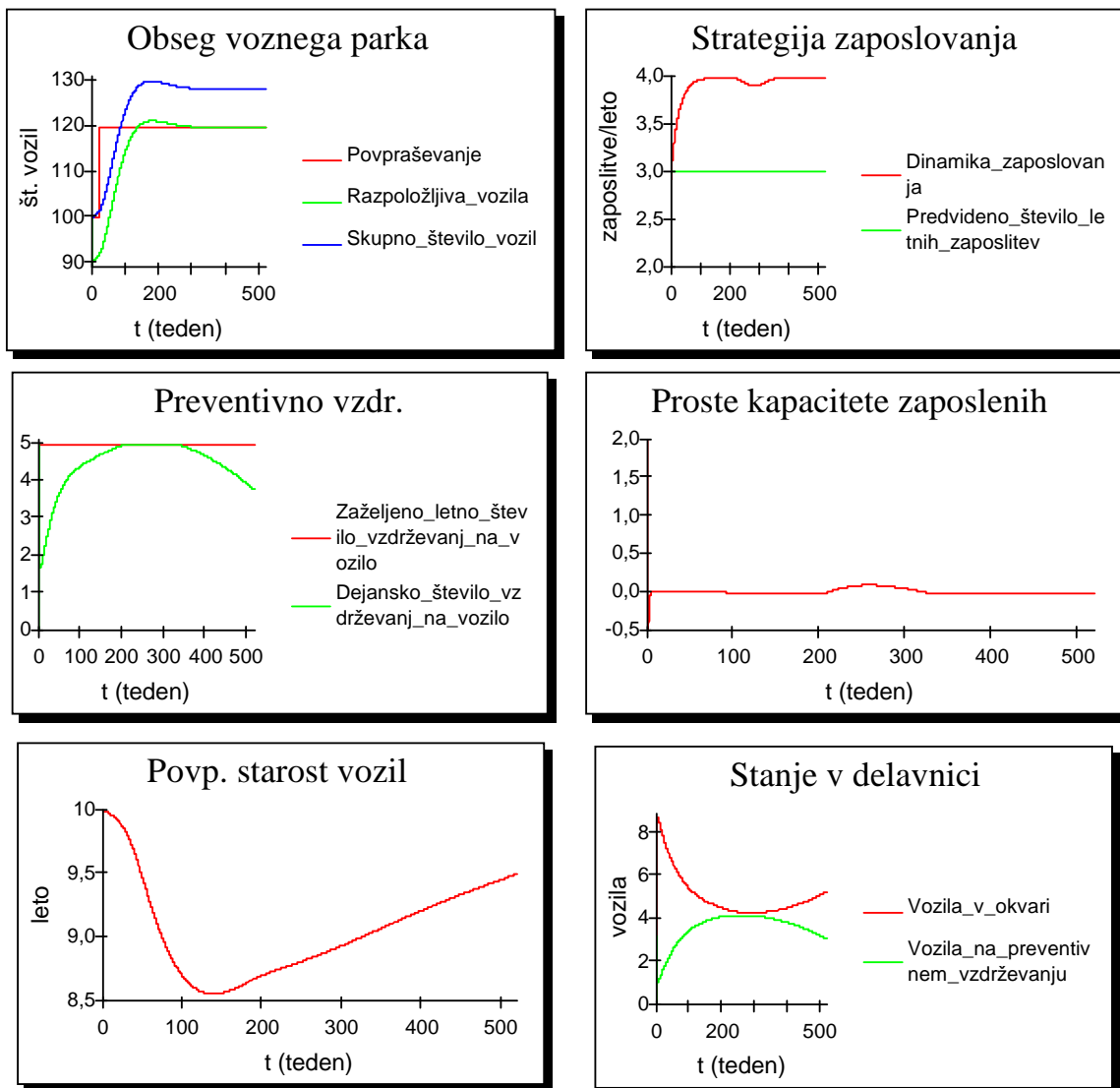
Vir: Lastna simulacija

Slika 27 prikazuje, da pri strategiji obnavljanja 7 obnovitev/leto v simulacijskem obdobju sploh ne uspemo zmanjšati povprečne starosti vozil za dve leti, torej ne dosežemo povprečne starosti 8 let. Če strategijo obnavljanja povečamo za eno vozilo letno, doseže vozni park povprečno starost 8 let po sedmih letih in pol. Ob povečanju obnovitev še za eno vozilo letno, dosežemo cilj po petih letih in štirih mesecih. Pri desetih obnovitvah letno to uspe že malo po četrtem letu. Pri strategiji obnavljanja 11 vozil/leto pa cilj dosežemo že v manj kot v treh letih in pol.

## 6.6 Analiza prilagajanja spremembam zunanjega povpraševanja

V tem delu analiziramo obnašanje sistema, ko se mora sistem prilagajati različnim spremembam zunanjega povpraševanja. Želimo vedeti, kako bo sistem deloval, ko bo potrebno reagirati na različne zahteve iz okolja. Analiziramo predvsem prilagajanje sistema v odvisnosti od reakcijskih časov, ki so v različnih organizacijah različni. Na ta način se lahko ugotovi, ali lahko rezultate izboljšamo, če skrajšamo reakcijske čase v podjetju (zaznavanje, analiziranje, odločanje). Zanima nas predvsem prilagajanje obsega voznega parka spremembam zunanjega povpraševanja, hkrati pa lahko analiziramo tudi ostale pomembne parametre obnašanja sistema. Nekateri parametri obnašanja sistema so prikazani na sliki 28.

Slika 28: Odzivi sistema na spremembe zunanjega povpraševanja



Vir: Lastna simulacija

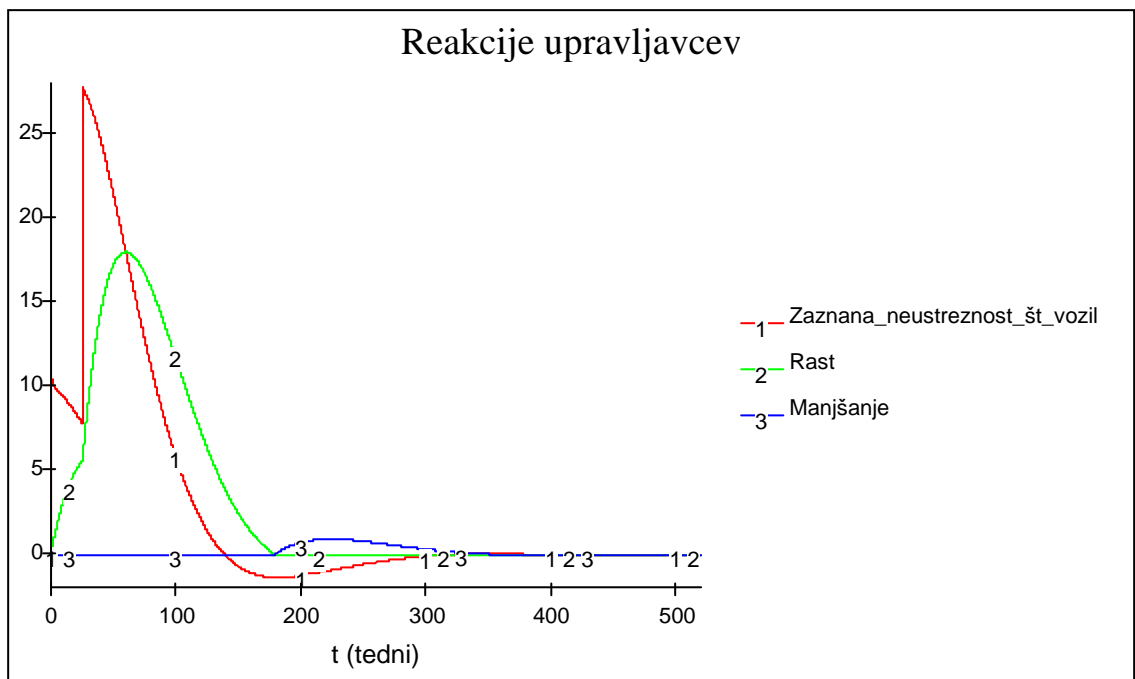
Slika 28 prikazuje obnašanje sistema pri odzivu na spremembo zunanjega povpraševanja, ko je zunanje povpraševanje izraženo s stopničasto rastjo. Začetna

vrednost zunanjega povpraševanja je 100 vozil, potem pa po določenem obdobju zraste na novo višjo vrednost. Tej vrednosti se je potrebno odzvati z razpoložljivimi vozili, ki pa so odvisna od strategije vzdrževanja. Če spremembi zunanjega povpraševanja sledimo z razpoložljivimi vozili, pa je potrebno v voznem parku imeti več vozil. Ob večanju števila vozil je potrebno povečati tudi zaposlovanje. Predvideno zaposlovanje v tem primeru ne zadostuje. Pri načrtovanju preventivnega zaposlovanja uspemo doseči po določenem obdobju zastavljeni načrt ter dobimo nekaj prostih kapacitet pri vzdrževalcih, to pa vpliva na stopnjo zaposlovanja, ki se kot posledica tega zmanjša. Povprečna starost se v začetni fazi zmanjša zaradi večjega števila novih vozil, potem pa začne zopet rasti. Kombinacija vseh teh faktorjev povzroči, da ne uspevamo več izpolnjevati zastavljenih načrtov vzdrževanja, zaradi vsega tega pa začnejo rasti okvare vozil. Prilagajanje obsega voznega parka zunanjemu povpraševanju vpliva na številne parametre, ki pa jih lahko na ta način s simulacijo predvidimo in se na njih vnaprej pripravimo.

Na diagramu vidimo, da krivulja števila razpoložljivih vozil sledi spremembi zunanjega povpraševanja in ga po določenem času preseže, nato pa zopet pade in se na koncu ustali okoli nove vrednosti. To je tipična krivulja zasledovanja cilja s preseganjem in oscilacijo.

Število razpoložljivih vozil preseže cilj zaradi tega, ker reakcije vedno zapoznijo glede na naše zaznave realnosti. Slika 29 prikazuje reakcije glede na zaznane vrednosti o spremembah povpraševanja.

Slika 29: Sledenje reakcij zaznavanju neustreznosti



Vir: Lastna simulacija

Rdeča krivulja prikazuje zaznane neustreznosti v obsegu voznega parka, zelena krivulja prikazuje rast, modra pa manjšanje voznega parka. Začetna vrednost zunanjega povpraševanja je bila 100, vozni park ima 100 vozil, vendar niso vsa

razpoložljiva. Tako takoj nastane zaznana neustreznost v voznem parku, zato se začne vplivati na stopnjo nabave vozil, da se prilagodi stanje voznega parka spremembam zunanjega povpraševanja. Tako začne krivulja zaznane neustreznosti padati, obenem pa vozni park raste. Krivulja postaja položnejša, saj se približuje zadanemu cilju. Pojavi pa se sprememba v zunanjem povpraševanju in zaznana neustreznost strmo naraste. Tako tudi krivulja rasti voznega parka začne naraščati. Zaznana neustreznost začne padati in ko se krivulji srečata, doseže krivulja rasti voznega parka svoj maksimum. Krivulja zaznane neustreznosti potem pade pod nič. Takrat je v voznem parku že preveč vozil. Krivulja rasti pada in sledi krivulji zaznane neustreznosti. Takrat se aktivira krivulja manjšanja, saj zaznamo, da imamo v voznem parku preveč vozil. Ker se zunanje povpraševanje ne spreminja več, se vse tri krivulje na koncu ustalijo pri nič. V naslednji fazi naredimo simulacije, ki bodo omogočale spremljanje obsega voznega parka pri različnih spremembah zunanjega povpraševanja in različnih reakcijskih dobah odziva na spremembe v podjetju. Reakcijske dobe bodo leto, pol leta in tri mesece. Izhajamo iz strategije, ki se je pri konstantnem obsegu voznega parka izkazala za stroškovno najučinkovitejšo in analiziramo, kako se spreminja pri prilagajanju na posamezne spremembe zunanjega povpraševanja.

Analiziramo naslednje možnosti:

- sprememba po konstantni linearni rasti,
- sprememba izražena s stopnico,
- sprememba izražena s sinusoido,
- sprememba izražena s stopničasto rastjo in padcem.

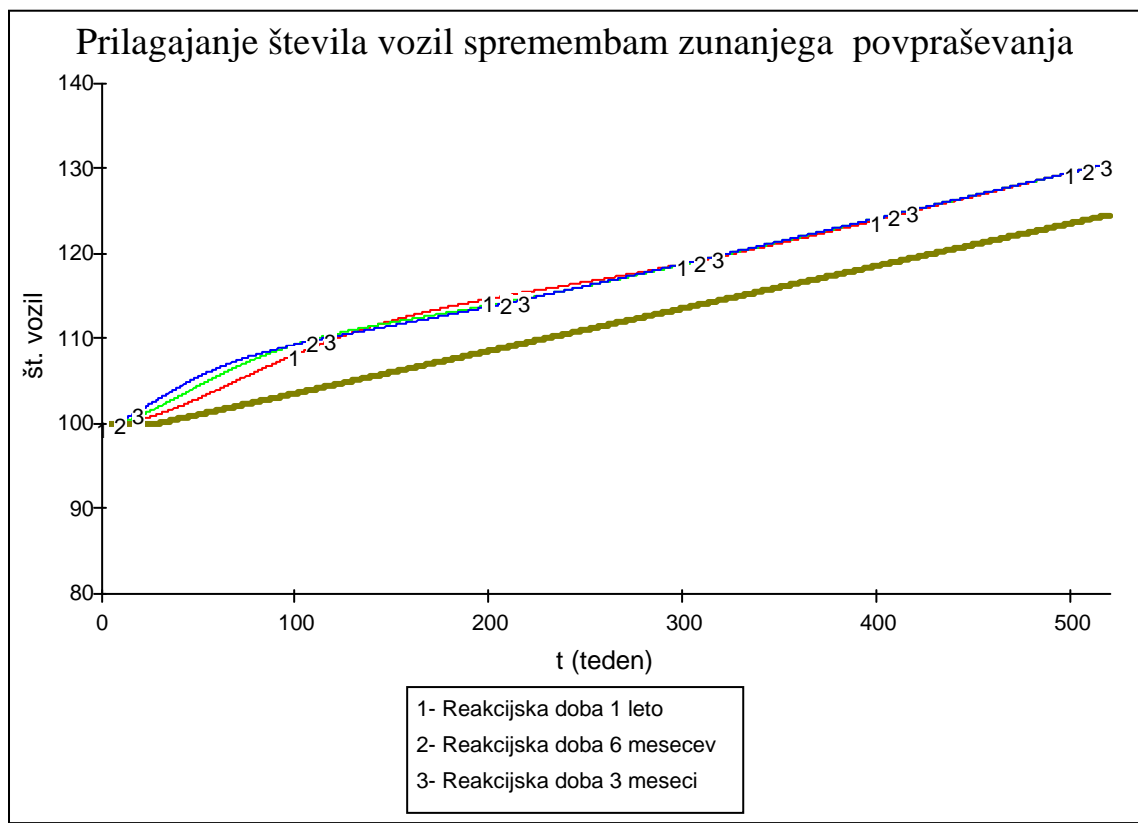
### 6.6.1 Sprememba zunanjega povpraševanja izražena s konstantno linearno rastjo

V prvem primeru izrazimo zunanje povpraševanje s konstantno linearno rastjo. Zunanje povpraševanje po storitvah je najprej enakomerno, nato pa začne konstantno linearno rasti. To spremembo definiramo s pomočjo funkcije RAMP:

$$\text{Zunanje povpraševanje} = 100 + \text{RAMP}(0,05, 26) \quad (42)$$

Enačba (42) pomeni, da je v izhodišču zunanje povpraševanje konstantno in sicer pri vrednosti 100 vozil, potem pa po 26 časovnih enotah (tednih) začne rasti. Vsako časovno enoto se poveča za vrednost 0,05. Tako bomo lahko primerjali odziv v spremembi števila vozil ob različnih reakcijskih dobah, ko se vrednost zunanjega povpraševanja ves čas povečuje. Torej bo moralo število vozil v voznem parku prav tako ves čas naraščati. Odzive sistema v skupnem številu vozil na spremembe zunanjega povpraševanja prikazuje slika 30.

Slika 30: Odziv na konstantno linearno rast zunanjega povpraševanja



Vir: Lastna simulacija

Krivulja z največjo reakcijsko dobo raste najbolj položno in najpozneje doseže svoj maksimum. Krivulji s hitrejšo reakcijsko dobo rasteta hitreje. Zaradi tega v začetni fazi povzročata, da je na razpolago več vozil, vendar se tudi hitreje prilagodita in zmanjšata število vozil. Po določenem obdobju se vse krivulje ustalijo in se prilagodijo na rast, ki je enakomerna. Simulacije vpliva teh sprememb na dobiček glede na različne reakcijske dobe so prikazane v tabeli 8.

Tabela 8: Dobiček pri konstantni linearni rasti zunanjega povpraševanja

Simulacije - konstantna linearna rast	
Reakcijska doba	Dobiček (d.e.)
1 leto	17.207.182,00
6 mesecev	17.229.109,00
3 mesece	17.240.672,00

Vir: Lastna simulacija

Tabela 8 prikazuje, da je pričakovano dobiček pri krajši reakcijski dobi večji, torej je pri konstantni linearni rasti zunanjega povpraševanja rezultat boljši, če se sistem hitreje odzove na zunanje spremembe. Razlike niso velike, saj se dogajajo le v začetni fazi prilagajanja, ko so odzivi glede na različno reakcijsko dobo različni. Kot kaže diagram na sliki 30, so krivulje v drugi fazi ustaljene.



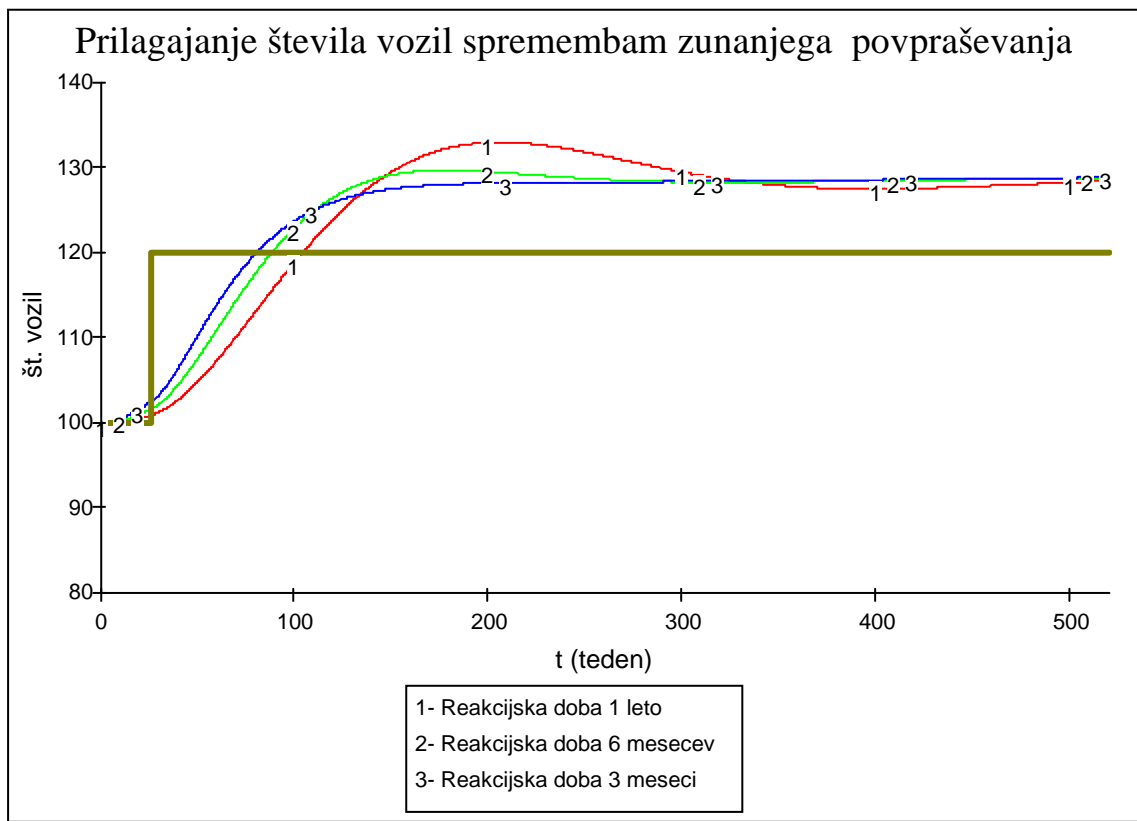
## 6.6.2 Sprememba zunanjega povpraševanja izražena s stopničasto funkcijo

V tem primeru je zunanje povpraševanje konstantno, nato pa v določenem trenutku zraste na neko novo vrednost in ostane konstantno na novi vrednosti. Tako dobi zunanje povpraševanje obliko stopnice. Za določitev si pomagamo s funkcijo STEP.

$$\text{Zunanje povpraševanje} = 100 + \text{STEP}(20, 26) \quad (43)$$

Enačba (43) nam poda zunanje povpraševanje, ki je najprej konstantno pri vrednosti 100, nato pa po 26 tednih zraste za vrednost 20. Odzive sistema v skupnem številu vozil na spremembo v tem primeru prikazuje slika 31.

Slika 31: Odziv na stopničasto rast zunanjega povpraševanja



Vir: Lastna simulacija

Tudi v tem primeru najbolj odstopa krivulja, ki predstavlja najdaljšo reakcijsko dobo. Vrh doseže najpozneje, potem pa pade pod zahtevano število vozil in znova naraste ter se ustali pri optimalni vrednosti števila vozil. Druga krivulja ima podoben potek, vendar lahko opazimo, da je dosti bolj zglajena. Tretja krivulja je še najbolj zglajena in v bistvu sploh ne doseže vidnega maksimuma in se tudi najprej uskladi s spremembo zunanjega povpraševanja. Rezultati simulacij glede na dobiček so prikazani v tabeli 9.

Tabela 9: Dobiček pri stopničasti rasti zunanjega povpraševanja

<b>Simulacije - stopničasta rast</b>	
Reakcijska doba	Dobiček (d.e.)
1 leto	18.471.326,00
6 mesecev	18.879.450,00
3 mesece	19.000.376,00

Vir: Lastna simulacija

Tabela 9 prikazuje, da je tudi tu pričakovano dobiček pri krajši reakcijski dobi večji. Reakcijska doba 6 mesecev pa da občutnejšo razliko proti reakcijski dobi enega leta glede na primer konstante linearne rasti zunanjega povpraševanja. Enako velja za najhitrejšo reakcijsko dobo. Vendar pa razlika med najkrajšo reakcijsko dobo in srednjo ni več takšna kot med srednjo in najdaljšo reakcijsko dobo. Opazimo, da so tu številke večje, kot pri primeru konstantne linearne rasti. Razlaga je v tem, da je tu prostornina pod krivuljo zunanjega povpraševanja večja kot v primeru konstantne linearne spremembe rasti zunanjega povpraševanja. Z drugimi besedami to pomeni, da je v tem primeru zunanje povpraševanje večje, kar poveča možnosti za prihodke, ki jih prilagodljiv sistem izkoristi.

### 6.6.3 Sprememba zunanjega povpraševanja izražena s sinusoido

V tej točki analiziramo odziv sistema na spremembo zunanjega povpraševanja, ki ga izrazimo s sinusoido. Za določitev zunanjega povpraševanja uporabimo funkcijo SINWAVE, ki nam poda sinusno gibanje sprememb zunanjega povpraševanja. Zunanje povpraševanje izrazimo z enačbo:

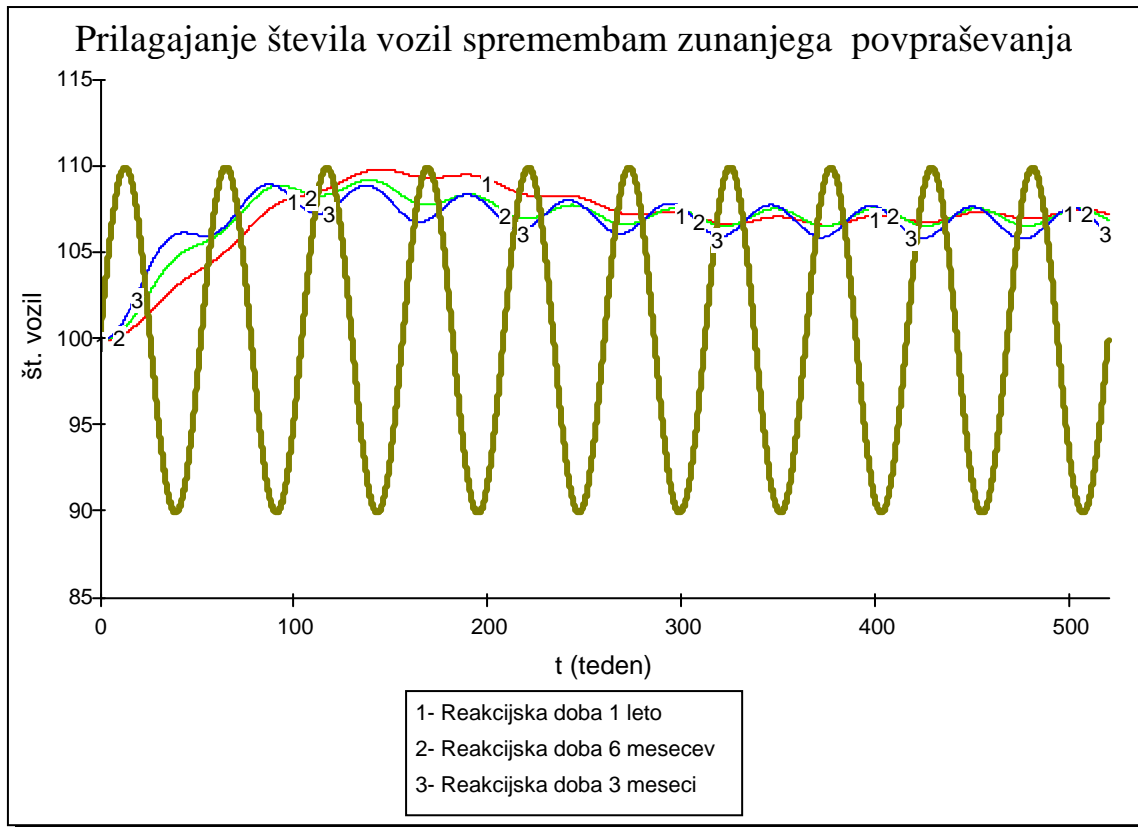
$$\text{Zunanje povpraševanje} = 100 + \text{SINWAVE}(10, 52) \quad (44)$$

Enačba (44) nam pove, da zunanje povpraševanje niha okoli vrednosti 100 z amplitudo 10 in periodo 52. To pomeni, da so vrhovi povpraševanja pri vrednosti 110, najnižje vrednosti oziroma doline pa pri 90. Perioda 52 tednov pomeni, da se cikel zaključi v enem letu. To si v praktičnem primeru lahko predstavljamo kot sezonska nihanja, kot na primer poleti je povpraševanje po naših storitvah večje, pozimi pa manjše. Odzivi sistema v primeru sprememb zunanjega povpraševanja v obliki sinusoide so prikazani na sliki 35.

Slika 35 prikazuje, da se pri vseh treh reakcijskih dobah začne število vozil v začetni fazi večati glede na izhodiščno število vozil. Tudi tu krivulja z najdaljšo reakcijsko dobo zraste najvišje, raste pa najpočasneje. Po tem pa krivulje začno nekoliko upadati. Pri vseh treh krivuljah so izraziti vrhovi in doline, ki kažejo na prilagajanje krivulji povpraševanja. Pri krivulji z najdaljšo reakcijsko dobo so ti vrhovi najmanj izraziti. Zaradi zamikov vrhovi nastajajo takrat, ko je povpraševanje

na najnižji točki, ko pa povpraševanje raste, se podjetje želi vozil znebiti, kot posledica predhodno zaznanega padanja povpraševanja.

Slika 32: Odziv na spremembe zunanjega povpraševanja izražene s sinusoido



Vir: Lastna simulacija

Dobiček pri simulacijah glede na različne reakcijske dobe pri spremembah zunanjega povpraševanja v obliki sinusoide je prikazan v tabeli 10.

Tabela 10: Dobiček pri sinusoidni spremembi zunanjega povpraševanja

Simulacije - sinusoidne spremembe	
Reakcijska doba	Dobiček (d.e.)
1 leto	15.547.044,00
6 mesecev	15.345.129,00
3 mesece	14.973.618,00

Vir: Lastna simulacija

Tabela 10 kaže, da je rezultat dobička pri najdaljšem reakcijskem času najugodnejši. To si lahko razlagamo na način, da so nihanja v številu vozil pri reakcijski dobi enega leta najmanjša. Pri krajših reakcijskih dobah se sistem sicer bolj prilagaja spremembam, zato pa povzroča večja nihanja. Pri daljši reakcijski dobi pa je v odločitev o nabavi vozil že vključen tudi podatek, da se je smer povpraševanja obrnila, zato so nihanja bolj glajena. V praksi to pomeni, da ne



Slika 33 kaže, da imamo najprej rast zunanjega povpraševanja, potem po določenem času padec, nato znova rast in znova padec. Tudi v tem primeru je krivulja, ki predstavlja najdaljšo reakcijsko dobo, najbolj oddaljena od krivulje, ki predstavlja zunanje povpraševanje. Prav tako doseže svoj optimum najpozneje ter se na ta način najpozneje prilagaja spremembam zunanjega povpraševanja. Krivulja, ki predstavlja najkrajšo reakcijsko dobo, se spremembam zunanjega povpraševanja prilagaja najhitreje. V tabeli 11 je prikazano še, kako se to odraža na dobiček.

Tabela 11: Dobiček pri slučajnih spremembah v rasti in padcu zunanjega povpraševanja

<b>Simulacije - slučajne spremembe rasti in padca</b>	
Reakcijska doba	Dobiček (d.e.)
1 leto	12.809.379,00
6 mesecev	12.951.743,00
3 mesece	13.312.634,00

Vir: Lastna simulacija

Tu je najboljši rezultat pri najkrajšem odzivnem času, je pa v tem primeru večja razlika med najkrajšo reakcijsko dobo in srednjo kot pa med srednjo in najdaljšo. Za razliko od primera, ko se zunanje povpraševanje spreminja v obliki konstantne linearne rasti in v obliki stopničaste rasti, se v tem primeru krivulje ne ustalijo in med njimi nastanejo večje razlike pri rezultatih dobička.

## 6.7 Nadgradnja simulatorja z vključitvijo modela za večkriterijsko odločanje

Do sedaj izvedene simulacije smo ocenjevali le z vidika predvidenega dobička. Za upravljavce sistemov pa so v večini primerov pomembni tudi drugi kriteriji. V primeru upravljanja voznega parka so pomembni kriteriji še razpoložljivo število vozil, povprečna starost vozil, stopnja okvar, izkoristek vzdrževalcev, pomembno je tudi, da dosegamo zadane cilje pri načrtovanju vzdrževalnih aktivnosti. Vsi kriteriji pa kljub vsemu niso enako pomembni, zato je potrebno kriterijem določiti uteži. Primernost posamezne variante lahko določimo z enačbo:

$$V(x_1(a), x_2(a), \dots, x_n(a)) = \frac{\sum_{i=1}^n V(x_i(a)) * W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (46)$$

Kjer je:

$V(x_1(a), x_2(a), \dots, x_n(a))$  - primernost variante v odvisnosti od posameznih kriterijev,

$V(x_i(a))$  - primernost variante v odvisnosti od i-tega kriterija,

$x_1, x_2, \dots, x_n$  -skupina kriterijev,

$W_i$  - utež i-tega kriterija,

$a$  - varianta, alternativa.

Izberemo varianto, ki dobi najboljšo oceno. V naslednji fazi je potrebno določiti uteži kriterijem in pa način ocenjevanja posameznih kriterijev.

### 6.7.1 Določitev uteži posameznim kriterijem

Za določitev uteži posameznim kriterijem lahko uporabimo metodo AHP - analytic hierarchy process, kar pomeni metoda analitično hierarhičnega procesa. AHP metoda je orodje, ki se uporablja v primerih, ko je vključeno večkriterijsko odločanje (Winston, 2004, str. 785). V ta namen izdelamo primerjalno matriko kriterijev s pomočjo katere medsebojno primerjamo pare posameznih kriterijev.

Tabela 12: Primerjalna matrika kriterijev

Primerjalna matrika kriterijev						
	Dobiček (d.e.)	Razpoložljivost (št.vozil)	Stopnja okvar (okvare/teden)	Povp.starost (leto)	Doseganje prev. vzd. (posegi/leto)	Izkoristek vzdrževalcev (%)
Dobiček (d.e.)	1	7	7	9	9	9
Razpoložljivost (št.vozil)	1/7	1	3	3	3	3
Stopnja okvar (okvare/teden)	1/7	1/3	1	1/2	3	2
Povp.starost (leto)	1/9	1/3	2	1	3	3
Doseganje prev. vzd. (posegi/leto)	1/9	1/3	1/3	1/3	1	3
Izkoristek vzdrževalcev (%)	1/9	1/3	1/2	1/3	1/3	1

Vir: Lastna simulacija

Tabela 12 prikazuje primerjalno matriko kriterijev. Kriteriji, ki jih bomo upoštevali pri večkriterijskem odločanju, so poleg dobička še: razpoložljivo število vozil, stopnja okvar, povprečna starost vozil, doseganje ciljev strategije preventivnega vzdrževanja in izkoristek vzdrževalcev. Vnos v vrstico i in stolpec j nakazuje, koliko pomembnejši je i-ti kriterij od j-tega kriterija. Posledično temu je vrednost v polju j-te vrstice in i-tega stolpca ravno obratna. Vrednosti v polju i-te vrstice in i-tega stolpca pa so 1. Kako določimo vrednosti v posameznem polju, je prikazano v tabeli 13.

Tabela 13: Razlaga vnosov v primerjalno matriko kriterijev

Razlaga vnosov v primerjalno matriko kriterijev	
Vrednost $a_{ij}$	Razlaga
1	Kriterija i in j sta enako pomembna
3	Kriterij i je nekoliko pomembnejši od kriterija j
5	Kriterij i je močno pomembnejši od kriterija j
7	Kriterij i je zelo močno pomembnejši od kriterija j
9	Kriterij i je absolutno pomembnejši od kriterija j
2,4,6,8	Vmesne vrednosti

Vir: Winston (2004)

V tabeli 13 so prikazane vrednosti, s katerimi določimo primerjavo pomembnosti med posameznima kriterijema. Ocenimo pomembnost enega kriterija proti drugemu z ocenami od 1 do 9. V naslednji fazi določimo uteži posameznim kriterijem. Po določitvi uteži pa je potrebno preveriti še indeks doslednosti, ki mora biti dovolj majhen, da lahko ugotovimo, da so uteži posameznim kriterijem določene dovolj dosledno oziroma natančno. Če indeks doslednosti ni dovolj majhen, to nakazuje na pomembne nedoslednosti v primerjalni matriki in posledično pomeni, da odločitveni model ni primeren. Po izračunu uteži in določitvi indeksa doslednosti, ki je podan v prilogi 7, dobimo uteži za posamezne kriterije, ki so prikazani v tabeli 14.

Tabela 14: Uteži posameznih kriterijev v večkriterijskem odločitvenem modelu

Uteži kriterijev							
Kriterij	Dobiček	Razpoložljivost	Stopnja okvar	Povp.starost	Doseganje prev. vzd.	Izkoristek vzdrževalcev	$\Sigma$
<b>Utež</b>	0,57	0,15	0,08	0,10	0,06	0,04	1

Vir: Lastna simulacija

Tabela 14 prikazuje odločitveni model, v katerem ima dobiček še vedno več kot polovično vlogo. Drugi najpomembnejši kriterij je razpoložljivost, nato pa povprečna starost. Ostali trije kriteriji imajo manj kot 10 % delež pri sprejetju odločitve. Kljub temu da bo v odločitvi delež dobička še vedno najmočnejši, pa model vseeno omogoča, da bodo pri odločanju upoštevani tudi drugi kriteriji. Seveda je to le primer, ki prikaže, kako lahko nadgradimo simulator z modelom za večkriterijsko odločanje. V drugem primeru se lahko določijo tudi povsem drugačne uteži posameznim kriterijem. Upravljevec z drugačnimi cilji pri delovanju sistema mora le znova izpolniti primerjalno matriko in ponoviti izračun v prilogi 7.

## 6.7.2 Določitev ocen posameznim kriterijem

V naslednji fazi večkriterijskega odločanja je potrebno določiti način ocenjevanja variant po posameznih kriterijih. Vsak kriterij posamezne variante ovrednotimo z ocenami od 1 do 5. Način ocenjevanja kriterijev je podan v tabeli 15.

Tabela 15: Vrednotenje kriterijev odločitvenega modela

Vrednotenje kriterijev							
		Kriterij					
Ocena	Opis	Dobiček (10 <sup>6</sup> d.e.)	Razpoložljivost (št.vozil)	Stopnja okvar (okvare/teden)	Povp.starost (leto)	Doseganje prev. vzd. (delež)	Izkoristek vzdrževalcev (delež)
5	Odlično	> 15	> 96	< 4	< 5	1	1
4	Zelo dobro	> 14	> 94	< 6	< 7	> 0,9	> 0,90
3	Dobro	> 13	> 92	< 7	< 9	> 0,8	> 0,80
2	Slabo	> 11	> 90	< 8	< 12	> 0,5	> 0,70
1	Nezadovoljivo	< 11	< 90	> 8	> 12	< 0,5	< 0,70

Vir: Lastna simulacija

Iz tabele 15 je razvidno, da vsako varianto ocenimo z opisno oceno in njej pripadajočo številčno oceno. Poleg tega so v tabeli 15 opisana odločitvena pravila, s pomočjo katerih kriteriji posameznih variant dobijo pripadajoče ocene. Potrebno je poudariti, da bo v tem primeru posamezna varianta, ki ima nekoliko boljši ali slabši rezultat od druge dobila enako oceno, če bo znotraj istega razreda ocene. Vendar je to zadovoljivo, saj za simulacijo ne moremo z gotovostjo trditi, da bo rezultat v realnosti točno takšen. Poleg tega pa variante, ki imajo približno enako skupno oceno, lahko še enkrat podrobneje analiziramo.

Tudi pri vrednotenju posameznih variant bi lahko uporabili metodo AHP, vendar simulacije izvedemo z večjim številom variant, zato je način vrednotenja z ocenami posameznih kriterijev v tem primeru ustrežnejši. Metoda AHP je primernejša za ocenjevanje pri manjšem številu variant.

## 6.7.3 Izvajanje simulacij in ocenjevanje posameznih variant

Ko so določene uteži posameznim kriterijem in način ocenjevanja, lahko začnemo z izvajanjem simulacij. Simulacije izvedemo za primer voznega parka s konstantnim obsegom. Strategije določimo na enak način. Vsako strategijo pa tokrat ocenimo po izbranih kriterijih na način, opisan v prejšnjem poglavju. Zanima nas, ali se bodo pojavila kakšna bistvena odstopanja pri najprimernejših strategijah in ali bodo tokrat primernejše kakšne druge strategije, glede na to da dobiček ni več edini kriterij. Izvajanje simulacij in rezultate prikazuje tabela 16.



Tabela 16: Simulacije pri večkriterijskem odločitvenem modelu

Simulacije - večkriterijski odločitveni model											
Varianta	Strategija			Ocene kriterijev in uteži						Skupna ocena	Primerrost
				Dobiček	Razpoložljiv.	Stopnja okvar	Povp.st.	Prev. vzd.	Izkoristek vzd.		
	Obn.	Prev.	Zap.	0,57	0,15	0,08	0,10	0,06	0,04		
1	3	2	3	1	1	2	1	1	3	1,16	27
2	4	2	5	5	3	3	2	5	2	4,11	6
3	4	2	9	4	3	4	2	5	1	3,58	11
4	4	3	3	2	1	2	1	1	3	1,72	26
5	5	4	6	5	3	4	2	5	1	4,15	4
6	4	3	8	5	3	4	2	5	1	4,15	5
7	4	5	3	3	1	3	2	2	4	2,57	22
8	5	6	6	5	3	5	2	5	2	4,27	2
9	4	7	8	4	2	5	2	5	2	3,55	12
10	9	2	3	4	4	5	4	5	2	4,06	7
11	8	2	5	4	4	5	3	5	2	3,96	8
12	7	2	9	3	4	4	3	5	1	3,27	14
13	6	3	3	5	3	4	2	5	3	4,23	3
14	8	4	6	4	4	5	3	5	1	3,92	9
15	8	3	8	3	4	5	3	5	1	3,35	13
16	6	5	3	5	3	5	2	4	4	4,29	1
17	8	6	6	3	3	5	3	5	2	3,24	15
18	8	7	8	3	3	5	3	5	1	3,20	16
19	11	2	3	3	5	5	4	5	2	3,65	10
20	12	2	5	2	5	5	4	5	1	3,04	17
21	14	2	8	1	5	5	5	5	1	2,58	23
22	13	3	3	2	4	5	4	5	2	2,93	20
23	12	4	6	2	4	5	5	5	1	2,99	19
24	14	3	9	1	5	5	5	5	1	2,58	24
25	13	5	3	2	4	5	5	5	2	3,03	18
26	12	6	6	2	4	5	4	5	1	2,89	21
27	14	7	9	1	4	5	5	5	1	2,43	25

Vir: Lastna simulacija

Če primerjamo simulacije večkriterijskega odločanja iz tabele 16 s simulacijami, ki upoštevajo samo dobiček (tabela 4), vidimo, da najboljša varianta ostane ista. Tudi variante, ki sledijo, so podobne. V primeru večkriterijskega odločanja preide osma varianta na drugo mesto. Razlika je tudi pri drugi varianti, ki pade z drugega mesta na šesto. Ugotovimo lahko, da je v odločitvenem modelu delež dobička še vedno prevladoval. Osma varianta doseže boljši rezultat v primerjavi z drugo predvsem zaradi kriterija stopnja okvar. Vzrok boljšega rezultata na tem področju pa je večje število preventivnih vzdrževanj. Na področju razpoložljivosti ni razlik med variantama, vendar pa je varianta z več vzdrževanj razumljivo boljša od tiste z manj, saj so postanki načrtovani in je zaradi tega razpoložljivost mnogo bolj predvidljiva. Enako kot pri enokriterijskem odločanju tudi tu opravimo še občutljivostno analizo spremembe parametrov.

## 6.7.4 Občutljivostna analiza spremembe parametrov pri večkriterijskem odločitvenem modelu

Tudi pri večkriterijskem odločitvenem modelu naredimo občutljivostno analizo na podoben način z namenom, da ugotovimo, ali je možno optimalno rešitev še izboljšati. Parametre posameznih strategij spreminjamo za eno enoto in iščemo, ali je v okolici najboljše simulirane rešitve še katera boljša. Rezultati simulacij so prikazani v tabeli 17.

Tabela 17: Občutljivostna analiza spremembe parametrov pri večkriterijskem odločitvenem modelu

Simulacije - občutljivostna analiza spremembe parametrov, večkriterijski odločitveni model											
Varianta	Strategija			Ocene kriterijev in uteži						Skupna ocena	Primernost
				Dobiček	Razpoložljiv.	Stopnja okvar	Povp.st.	Prev. vzd.	Izkoristek vzd.		
	Obn.	Prev.	Zap.	0,57	0,15	0,08	0,10	0,06	0,04		
<b>1</b>	6	5	3	5	3	5	2	4	4	4,29	<b>4</b>
<b>2</b>	7	5	3	5	3	5	3	5	4	4,45	<b>1</b>
<b>3</b>	5	5	3	5	1	3	2	2	3	3,67	<b>7</b>
<b>4</b>	6	6	3	5	3	4	2	3	4	4,15	<b>6</b>
<b>5</b>	6	4	3	5	3	5	2	5	3	4,31	<b>2</b>
<b>6</b>	6	5	4	5	3	5	2	5	2	4,27	<b>5</b>
<b>7</b>	6	5	2	1	1	5	2	1	4	1,54	<b>8</b>
<b>8</b>	5	5	4	5	3	5	2	5	3	4,31	<b>2</b>

Vir: Lastna simulacija

Tudi tu vidimo, da lahko strategijo še nekoliko izboljšamo. Za boljšo se izkaže tista, ki ima eno obnovitev vozila letno več. Ta strategija dobi boljšo oceno pri kriterijih povprečne starosti in pa izpolnjevanju načrta preventivnega vzdrževanja. Boljša ocena pri povprečni starosti je posledica večje količine nabavljenih vozil. Zaradi tega je stopnja okvar nekoliko manjša. To se sicer ne pozna pri oceni stopnje okvar, se pa zato pozna pri lažjem izpolnjevanju preventivnih nalog, saj ostane več časa za le-te. Opazi se tudi, ko je bil edini kriterij dobiček, je bilo potrebno zmanjšati strategijo obnovitev, da smo dobili boljši rezultat. V primeru, ko dobiček ni edini kriterij, lahko strategijo obnovite pospešimo. Pri rešitvi z manj obnavljanja voznega parka je bilo potrebno povečati zaposlovanje, zato pa pri strategiji z več obnovitev tega ni potrebno storiti. Posledično je tako tudi izkoristek vzdrževalcev boljši. Torej lahko ugotovimo, da se smer iskanja najboljše variante pri vključitvi več kriterijev v odločitev nekoliko spremeni.

## 7 Sklep

Z delom smo želeli prikazati, da je analiza s simulatorjem primeren način za preučevanje problemov, ki se pojavljajo na področjih upravljanja z voznimi parki. Načela sistemske dinamike in računalniška orodja, ki so prirejena sistemski dinamiki omogočajo izgradnjo simulatorja. Ta omogoča preizkušanje različnih strategij, ki jih lahko managerji in upravljalci izvedejo na enostaven, pregleden in hiter ter učinkovit način.

Tako kot pri številnih drugih problemih povezanih z upravljanjem in managementom, je tudi na tem področju odločanje o različnih strategijah večkriterijski problem. Odločitve o posameznih parametrih se med sabo prepletajo in medsebojno vplivajo. Posledice odločitev so pri upravljanju večjih sistemov lahko zelo nepredvidljive, oddaljene v prihodnosti in tudi zelo presenetljive in neugodne. Večina odločitev in ukrepov povezanih z odločitvami ima na parametre, na katere želimo vplivati, nelinearen vpliv, kar še posebej povzroča, da so rezultati mnogokrat takšni, kot jih ne pričakujemo.

Pri upravljanju voznih parkov se prepletajo številni parametri, ki medsebojno vplivajo drug na drugega (povprečna starost voznega parka, količina preventivnega vzdrževanja, organiziranje vzdrževanja, število zaposlenih vzdrževalcev, struktura vzdrževalcev, stroški vozil, stroški okvar ...) in so preučeni v modelu. Model omogoča analizo njihovih medsebojnih vplivov in vplivanje na parametre, ki omogočajo učinkovito delovanje voznega parka, kot so predvsem razpoložljivost in pa prilagajanje na različne zunanje spremembe.

Pri vzdrževanju imamo tri osnovne možnosti, ki jih lahko razdelimo na: vzdrževanje ob okvarah, preventivno vzdrževanje in pogojno vzdrževanje. Namen modela je bilo predvsem preučevanje vpliva preventivnega vzdrževanja na stopnjo okvar, ki manjša razpoložljivost vozil. Odločitve v zvezi s preventivnim vzdrževanjem je potrebno usklajevati tudi z drugimi odločitvami, ki so povezane z obnavljanjem vozil in upravljanjem s človeškimi viri.

Z nalogo pokažemo, da se da zgraditi simulator, ki omogoča analizo posameznih strategij na enostaven in pregleden način.

Pokažemo tudi, da je možno preučevati različne strategije pri zelo različnih vhodnih podatkih in hkrati spremljati številne kazalce, ki vplivajo na uspešnost podjetja, ki se ukvarja s transportnimi storitvami. Model je prilagodljiv in se lahko ob manjših prilagoditvah uporablja tudi pri preučevanju vzdrževalnih strategij tudi za drugo opremo. Hkrati vidimo, da je možno preučevati strategije ob konstantnem obsegu voznega parka in tudi, kako se lahko vozni park prilagaja izzivom okolice, kot so spremembe zunanjega povpraševanja. Analiziramo lahko prilagajanje obsega voznega parka na kakršnekoli različne oblike sprememb zunanjega povpraševanja, ki se lahko pojavijo.

Vloga simulatorja pa je koristna tudi na področju izobraževanja in usposabljanja, saj se da s simulatorjem na enostaven način predstaviti zakonitosti delovanja sistema tudi tistim, ki se v upravljanje in vodenje takšnih sistemov šele uvajajo.

Na kratko so osnovne prednosti simulatorja pred drugimi načini odločanja o upravljanju voznega parka podjetja in tudi drugih kompleksnih sistemov predvsem:

- spoznavanje medsebojnih vplivov elementov v sistemu,
- preizkus številni strategij upravljanja na poceni in neškodljiv način,
- možnosti preučevanja sistema kljub nepopolnim podatkom o posameznih parametrih,

- preizkušanje številnih možnih hipotetičnih situacij,
- izobraževanje in usposabljanje za vodenje sistema.

Poleg tega pa prikažemo, da se da takšne simulatorje tudi nadgraditi z vključitvijo modelov za večkriterijsko odločanje. S takšno nadgradnjo dosežemo, da se lahko preizkuša strategije v primerih, ko so cilji upravljavcev sistema različni. V teh primerih se upravljavec odloča po različnih kriterijih, ki imajo zanj različno pomembnost. Uteži posameznim kriterijem določimo z analitično hierarhičnim procesom. Tako lahko izluščimo iz upravljavčevih miselnih modelov, kateri kriteriji so zanj pomembnejši in temu primerno poiščemo najprimernejšo strategijo upravljanja z voznim parkom. V sklopu večkriterijskega odločanja priredimo tudi model, ki omogoča opisno in številčno vrednotenje posameznih kriterijev. Ocene po posameznih kriterijih pa na koncu ob upoštevanju uteži določijo skupno oceno posamezne strategije.

Simulator omogoča tudi izvajanje občutljivostnih analiz. Analiziramo lahko, kako so občutljivi posamezni rezultati simulacij na majhne spremembe parametrov. Občutljivostna analiza omogoča tudi analizo predpostavk. Tako lahko ugotovljamo, kako so občutljivi rezultati simulacij na spremembe v predpostavkah.

V magistrskem delu so v prvi fazi opisane osnovne značilnosti in predvsem prednosti ter slabosti modeliranja in simulacij kot orodja za pomoč pri odločanju o upravljanju sistemov. Opisani so tudi osnovni postopki pri izvajanju modeliranja in simulacij.

V nadaljevanju so opisana načela sistemske dinamike kot orodja za izvajanje simulacij. Opisane so osnovne oblike obnašanja dinamičnih sistemov, pomembnost diagramov vpliva za razumevanje sistema, pomen nivojev in pretokov ter računalniška orodja, ki se uporabljajo pri gradnji in simulaciji modelov.

Sledi poglavje, v katerem so opisane možnosti in načela, ki se uveljavljajo pri vzdrževanju tako vozil kot opreme na splošno. Prikazane so osnovne strategije in njihov razvoj. Hkrati so podane prednosti in slabosti posameznih strategij ter karakteristike, ki jih moramo upoštevati, ko se odločamo za uveljavitev posamezne strategije.

V osrednjem delu je prikazano, kako se zgradi simulacijski model. Opisani so posamezni moduli sistema in povezave ter vplivi med posameznimi elementi. Prikazano je tudi, kako te module združimo v celoto. Izdelani so tudi vmesniki, s katerimi je možno na enostaven način spreminjati parametre in spreminjati pogoje simulacij.

V zadnjem delu je prikazano, kako lahko izvajamo simulacije in analiziramo vozni park. V prvem delu izvajamo simulacije pri konstantnem obsegu voznega parka. Sledi občutljivostna analiza. Prikazan je tudi primer analize strategij ob različnih cenah nabavljenih vozil. Nato je opisano, kako lahko analiziramo strategije ob različnih spremembah zunanjega povpraševanja. Tako lahko preučujemo, kako se bo spreminjal obseg voznega parka, ko se bo potrebno prilagajati različnim oblikam sprememb zunanjega povpraševanja.

Na koncu sledi še prikaz, kako lahko simulator nadgradimo. Vključen je model za večkriterijsko odločanje. V tem primeru je omogočeno odločanje ob večjem številu kriterijev in prilagajanje pomembnosti kriterijev željam upravljavcev s pomočjo uteži.

Naš model je prilagojen na način, da so kot nivo modelirani število vozil v okvar in pa število vozil v postopku preventivnega vzdrževanja za razliko od Stermanovega, kjer so modelirane kot nivo okvare. To nam omogoča lažje spremljanje rezultatov simulacij in boljšo predstavo o stanju voznega parka

(razpoložljivost vozil). Zgrajen je podobno kot Varelisev model, vendar so prirejeni moduli za naš problem. Poleg tega dodamo modulu, ki obravnava stroške, tudi spremljanje prihodkov. Uporabljamo tudi starostno verigo, podobno kot jo uporablja Alfred za obravnavanje vojaške opreme, vendar jo priredimo cestnim vozilom. Dodamo odločitvena pravila o nabavi in menjavanju vozil. Glede na Bivonin model, damo precej večji poudarek v modelu samim postopkom vzdrževanja in procesom v delavnici. V model je vključen tudi samostojni Stermanov model zaposlovanja, ki postane del modela za vzdrževanje vozil.

Prednost modela je v enostavni razgradljivosti in uporabnosti samostojnih modulov.

Razlika proti vsem ostalim do sedaj opisanim modelom pa je tudi nadgradnja z modelom za večkriterijsko odločanje, kjer vključimo tudi AHP odločitveni proces.

Pomembnost rezultatov, ki jih s pomočjo simulacij dobimo, se kaže v tem, da lahko na neškodljiv način pridemo do podatkov, kako posamezne odločitve vplivajo na delovanje sistema. Vidimo, da lahko z uvajanjem preventivnega vzdrževanja zmanjšamo stopnjo okvar vozil. Na ta način lahko vplivamo na število razpoložljivih vozil. Z uvajanjem primerne strategije preventivnega vzdrževanja lahko tudi precej boljše načrtujemo razpoložljivost vozil. Enako lahko z obnovitvami vplivamo na povprečno starost vozil v voznem parku, s čimer prav tako lahko vplivamo na stopnjo okvar vozil. Hkrati lahko vidimo, da ima strategija obnovitev močan vpliv na dobiček. Tako nam simulacija omogoča iskanje optimalnih strategij pri iskanju najboljšega razmerja glede na dobiček. Simulacije pokažejo tudi, da je potrebno skrbno načrtovati tudi upravljanje s človeškimi viri oziroma zaposlovanje. Premajhna stopnja zaposlovanja ne omogoča uveljavljanja zelenih strategij v zvezi z vzdrževanjem. Prevelika stopnja zaposlovanja pa po nepotrebnem vpliva na manjšanje dobička. Simulacije v kombinaciji z modelom za večkriterijsko odločanje pokažejo, da se optimalna strategija ob upoštevanju dodatnih kriterijev poleg dobička spremeni. Sprememba strategije je odvisna od pomembnosti ostalih kriterijev glede na dobiček.

Prispevek dela je v dodatnem orodju, ki ga lahko uporabljajo upravljavci voznih parkov pri načrtovanju upravljanja z njimi. Pomembnost je predvsem v tem, da je možno preučevati, kako vplivajo odločitve na sistem, ko je upravljanje sistema večparametrsko. S simulacijo je preučevanje večparametrskih strategij bistveno olajšano. Res je izdelava simulatorja lahko tudi zamudno opravilo, vendar pa so po tem, ko je simulator zgrajen, tudi izboljšave in prireditve modela različnim pogojem in predpostavkam o modelu dodane na hiter in enostaven način. Pomemben prispevek je tudi v tem, da združi dokaj široko problematiko vzdrževanja s simulacijskim orodjem. Pri pregledu literature lahko ugotovimo, da je problematika modeliranja in simulacij zelo široko opisana, hkrati tudi simulacija po načelu sistemske dinamike. Zelo obširna je tudi literatura, ki obravnava različne strategije in probleme v zvezi z vzdrževanjem opreme. Prispevkov, ki povezujejo analizo problematike preučevanja vzdrževanja vozil s pomočjo simulacij pa je zaenkrat še malo.

# Literatura in viri

## Literatura

1. Bengtsson Marcus: Conditioned Based Maintenance on Rail Vehicles- Possibilities for a more effective maintenance strategy. IDPMTR 06, 2002, Transportforum Linköping 9.1. 2003
2. Bengtsson Marcus, Olsson Erik, Funk Peter, Jackson Mats: Technical Design of Conditioned Based Maintenance System- A Case Study using Sound Analysis and Case-Based Reasoning. Maintenance and Reability Conference, 8th Congress, 2-5 Maj 2004, University of Tennessee, Maintenance and Reability Center, Knoxville
3. Bivona Enzo, Montemaggiore Giovan B.: Evaluating Fleet Maintenance Management Strategies through System Dynamics Model in a City Bus Company. 23rd International Conference of the System Dynamics Society 17-21 Julij, Boston 2005
4. Bogataj Marija: Mobilistika in prostor. Portorož: FPP-CERRISK; Ljubljana: RIUS center, d.o.o., 2000
5. Breirova Lucia, Choudari Mark: An Introduction to Sensitivity Analysis. MIT System Dynamics in Education Project, 1996
6. Chan Ling-Yau, Mui Lai-Man, Woo Chat-Ming: Reability analysis and maintenance policy of radiators for a large fleet of buses. Quality and Reability Engineering International, New York, 13(1997), 6, str. 117-126
7. Crespo Marquez Adolfo, Gupta Jatinder N.D. ,Heguedas Antonio Sanchez: Maintenance policies for a production system with constrained production rate and buffer capacity. International Journal of Production Research, London, 41(2003), 9, str.1909-1926
8. Čerić Vlatko: Simulacijsko modeliranje. Zagreb: Školska knjiga, 1993, 328 str.
9. Forrester Jay W.: Industrial dynamics, 8th printing. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1973, 464 str.
10. Forrester Jay W.: Principles of Systems, Wright-Allen Press, 1976, 391 str.
11. Forrester Jay W.: Designing the Future, University of Sevilla, 15. December 1998
12. Gordon Geoffry: System Simulation, 2nd edition. New York: Prentice Hall, 1977, 324 str.
13. Horner R. Malcom W., El-Haram Mohamed A., Munns Andy K.: Building maintenance strategy- a new management approach. Journal of Quality in Maintenance Engineering, Bradford, UK, 3(1997), 4, str 273-280
14. Hsueh Joe C., Dogan Gokhan, Sterman John D.: Teaching strategic Management with the Industry Evolution Management Flight Simulator. 24th International Conference of the System Dynamics Society 23-27 Julij, Nijmegen, Nizozemska, 2006
15. Kelly Anthony, Harris M.J.: Management of Industrial Maintenance. London: Butterworth-Heinemann, 1983, 272 str.
16. Kljajić, Miroljub: Teorija sistemov. Kranj: Moderna organizacija. 1994, 239 str.

17. Kutucuoglu K.Y., Hamali J., Irani Z., Sharp J.M.: A framework for managing maintenance using performance measurement system. *International Journal of Operations&Production Management*, Bradford, UK, 21(2001) 1/2, str.173-194
18. Lofsten Hans: Management of Industrial Maintenance- Economic Evaluation of Maintenance Policies. *International Journal of Operations & Production Management*, Bradford, UK, 19(1999), 7, str. 716-737
19. Lofsten Hans: Measuring maintenance performance- in search for a maintenance productivity index. *International Journal of Production Economics*, Amsterdam, 63(2000),1, str. 47-58
20. Maier Frank: Feedback Structures Driving Success and Failure of Preventive Maintenance Programs. 7th International Conference of the European Operations Management Association, Vlerick Leuven Ghent Management School, 2000, str. 376-383
21. Mashayekhi Ali N.: Oscillation in Preventive Maintenance Programs. 16rd International Conference of the System Dynamics Society 17-21 Julij, Boston, 1996
22. Matulionis Raymond C., Freitag Joan C: Preventive Maintenance of Buildings. London: Van Nostrand Reinhold, 1991, 326 str.
23. Meadows Donella, Randers Jorgen, Meadows Dennis: Limits to Growth: The 30-Year Update. White River Junction, VT: Chelsea Green Publishing, 2004, 368 str.
24. Miragliotta Giovanni, Brun Alessandro, Soydan Ilker A.:Coordinating multi-bussines sales through management simulators. Fourteenth International Working Seminar on Production Economics, Vol.3, str. 209-221, Innsbruck, February 20-24, 2006
25. Mulder Jeroen: Reducing Maintenance Time: An Alternative to Increasing System Reability. 2nd Annual Hawaii International Conference on Statistic and Related Fields, Hawai 2003
26. Nakajima Seiichi: Introduction to TPM. Cambridge, Massachusetts: Productivity Press; 1988, 129 str.
27. Oliva Rogelio, Sterman John D.:Cutting Corners and Working Overtime: Quality Erosion in the Service Industry. *Management Science*, Informs, Hanover, USA, 47(2001), 7, str. 894-914
28. Peres Francois, Noyes Daniel: Evaluation of a maintenance strategy by the analysis of the rate of repair. *Quality and Reability Engineering International*, New York 19(2003), 2, str. 129-148
29. Pidd Michael: Tools for thinking: modelling in management science. Chichester: John Willey & Sons Ltd. 1996, 350 str.
30. Pitt M., Goyal S., Sapri M.: Innovation in facilities maintenance management. *Building Services Engineering Research and Technology*, 27(2006), 2, str. 153-164
31. Pomorski Thomas R.: Total Productive Maintenance (TPM), Concepts and Literature Review, April 30, 2004
32. Pritsker Alan A.: Introduction to Simulation and SLAM II, 3rd edition. New York: John Wiley&Sons, Inc., 1986, 839 str.
33. Repenning Nelson P., Sterman John D.: Nobody ever gets credit for fixing problems that never happened: creating and sustaining process improvement. *California Management Review*, 43(2001), 4, str. 64-88
34. Roberts Edward B.: Managerial applications of system dynamics. Cambridge, Massachusetts: MIT Press/Wright-Allen. 1981, 669 str.

35. Russel Roberta S., Taylor Bernard W.: Operations management: focusing on on quality and competitiveness, 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, Inc. 2000, 868 str.
36. Shreckengost Raymond C.: Dynamic Simulation Models: How valid are they?. Maryland: NIDA Research Monographs 57, 1985
37. Sterman John D.: Business dynamic: system thinking and modelling for a complex world. Boston: Irwin McGraw-Hill. 2000, 982 str.
38. Sterman John D.: System Dynamics: system thinking and modelling for a complex world. MIT Boston , ESD Internal Symposium 13.1.2003
39. Sterman John D.: All Models are Wrong: Reflection on Becoming a System Scientist. System Dynamics Review, New York, 18(2002), 4, str. 501-531
40. Stevenson William J.: Production/operations management, 4th edition. Burr Ridge: Irwin, 1993
41. Susman G. I.: Product life cycle management. Journal of cost management, 3(1989), Summer, str. 8-22
42. Thun Jorn-Henrik: Modelling modern maintenance- a System Dynamics model analyzing the dynamic implications of implementing total productive maintenance. 22nd International Conference of the System Dynamics Society 25-29 Julij, Oxford 2004
43. Tsang Albert H. C.: Conditioned-Based Maintenance: Tools and Decision Making. Journal of Quality in Maintenance Engineering, Bradford, UK 1(1995), 3, str. 3-17
44. Tsang Albert H. C.: Strategic Dimension of Maintenance Management. Journal of Quality in Maintenance Engineering, Bradford, UK, 8(2002), 1, str. 7-39
45. Varelis Angelos G., Stamboulis Yeoryios A., Adamides Emmanuel D.: A Life-Cycle System Dynamics Model of Aircraft Engine Maintenance. 20th International Conference of the System Dynamics Society 28.7-1.8 Palermo, 2002
46. Wireman Terry: Developin performance indicators for managing maintenance. New York: Industrial Press, Inc., 1998, 256 str.
47. Wang Hongzou: A survey of maintenance policies of deteriorating systems. European Journal of Operations Research, Amsterdam, 139(2002), 3, str. 469-489
48. Winston L. Wayne: Operations Research, Applications and Algorithms, 4th edition. Belmont, Brooks/Cole-Thompson Learning, 2004, 1418 str.

## Viri

1. Alfred Louis E., Thombs Victor J.: FleetSight: A Simulation Tool for Cost, Availability and Remaining Service Life of Aging Military Systems. (<http://www.decisiondynamics.com>), 12.1.2007
2. Li Michael, Simchi-Levi David: The Web Based Beer Game, Demonstrating the Value of Integrated Supply Chain. (<http://beergame.mit.edu/>), 22.2.2007
3. Manufacturing game. (<http://www.manufacturinggame.com>), 12.4.2007
4. MIT OpenCourseWare- System Dynamics for Business Policy, Fall 2003 (<http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Sloan-School-of-Management/15-074Fall2003>), 14.2. 2007



## Slovarček uporabljenih tujih izrazov

analytic hierarchy process (AHP) - analitično hierarhični proces

conditioned-based maintenance (CBM) - pogojno vzdrževanje, odvisno je od stanja opreme

inflow - pritok, povečuje vrednost nivojev

input - vhodna vrednost v sistemu

level - nivo

life cycle cost (LCC) - stroški v življenjskem ciklu

outflow - odtok, manjša vrednost nivojev

output - izhodna vrednost v sistemu

monitoring - spremljanje, nadzorovanje

total productivity maintenance (TPM) - politika vzdrževanja, popolno vzdrževanje proizvodnih sredstev

## Seznam prilog

Priloga 1: Model prilagajanja različnim spremembam zunanjega povpraševanja izražen z enačbami v jeziku programskega orodja Powersim

Priloga 2: Diagrami najboljših petih strategij pri osnovni simulaciji

Priloga 3: Diagrami najboljših petih strategij pri podaljšanem času simulacije

Priloga 4: Občutljivostna analiza spremembe parametrov

Priloga 5: Občutljivostna analiza deleža okvar

Priloga 6: Analiza odvisnosti povprečne starosti od strategije obnavljanja

Priloga 7: Izračun uteži kriterijem po metodi AHP

Priloga 8: Opis nekaterih uporabljenih funkcij

Priloga 9: Simulacijska metoda

## Priloga 1: Model prilagajanja različnim spremembam zunanjega povpraševanja izražen z enačbami v jeziku programskega orodja Powersim

```
init Dobiček = 0
flow Dobiček = +dt*Tedenski_prihodki
            -dt*Tedenski_stroški_popravitil
            -dt*Tedenski_stroški_prevencije
            -dt*Tedenski_stroški_obnavljanja_in_rasti
            -dt*Tedenski_stroški_vzdrževalcev
doc Dobiček = Dobiček, predstavlja razliko med prihodki, ki jih ustvarimo z vozili
in stroški, ki nastajajo z našimi aktivnostmi na področju obnavljanja voznega
parka, popravili, vzdrževalnimi posegi in politiko zaposlovanja
init Izkušeni_vzdrževalci = 10
flow Izkušeni_vzdrževalci = +dt*Stopnja_uvajanja
            -dt*Stopnja_odpovedi_izkušenih
doc Izkušeni_vzdrževalci = Število izkušenih delavcev (polno produktivnih)
init Najstarejša_vozila = Start_najstarejša
flow Najstarejša_vozila = -dt*Stopnja_zamenjave_najstarejših
            +dt*Stopnja_staranja_3
doc Najstarejša_vozila = Število vozil, ki jih štejemo za najstarejša, starost 15-20
let
init Neodplačana_vozila = 0
flow Neodplačana_vozila = +dt*Stopnja_obnavljanja
            +dt*Stopnja_rasti_voznega_parka
            -dt*Stopnja_odplačevanja
doc Neodplačana_vozila = Število vozil, ki še niso popolnoma izplačana.
init Nova_vozila = Start_nova
flow Nova_vozila = +dt*Stopnja_rasti_voznega_parka
            -dt*Stopnja_zamenjave_novih
            -dt*Stopnja_staranja_1
            +dt*Stopnja_obnavljanja
doc Nova_vozila = Število vozil, ki jih štejemo za nova - stara do 5 let.
init Novinci = 0
flow Novinci = +dt*Stopnja_zaposlovanja
            -dt*Stopnja_odpovedi_novincev
            -dt*Stopnja_uvajanja
doc Novinci = Nivo zaposlenih novincev, ki bodo v podjetju.
init Prihodki = 0
flow Prihodki = +dt*Tedenski_prihodki
doc Prihodki = Skupna vsota prihodkov, ki jih ustvarimo skozi simulirano
obdobje.
init Skupni_stroški_popravitil = 0
flow Skupni_stroški_popravitil = +dt*Tedenski_stroški_popravitil
doc Skupni_stroški_popravitil = Skupni stroški, ki nastanejo zaradi popravil skozi
simulirano obdobje.
init Skupni_stroški_preventivnega_vzdrževanja = 0
flow Skupni_stroški_preventivnega_vzdrževanja =
+dt*Tedenski_stroški_prevencije
```

doc Skupni\_stroški\_preventivnega\_vzdrževanja = Stroški, ki nastanejo v simuliranem obdobju zaradi preventivnega vzdrževanja.  
 init Skupni\_stroški\_vzdrževalcev = 0  
 flow Skupni\_stroški\_vzdrževalcev =  $+dt \cdot \text{Tedenski\_stroški\_vzdrževalcev}$   
 doc Skupni\_stroški\_vzdrževalcev = Skupni stroški, ki jih imamo z vzdrževalci v simuliranem obdobju.  
 init Solidna\_vozila = Start\_solidna  
 flow Solidna\_vozila =  $-dt \cdot \text{Stopnja\_zamenjave\_solidnih}$   
 $-dt \cdot \text{Stopnja\_staranja\_2}$   
 $+dt \cdot \text{Stopnja\_staranja\_1}$   
 doc Solidna\_vozila = Število vozil, ki jih štejemo za solidna, starost 5 - 10 let.  
 init Starejša\_vozila = Start\_starejša  
 flow Starejša\_vozila =  $-dt \cdot \text{Stopnja\_zamenjave\_starejših}$   
 $-dt \cdot \text{Stopnja\_staranja\_3}$   
 $+dt \cdot \text{Stopnja\_staranja\_2}$   
 doc Starejša\_vozila = Število vozil, ki jih štejemo za starejša, starost 10 - 15 let.  
 init Stroški\_za\_obnavljanja\_in\_rast = 0  
 flow Stroški\_za\_obnavljanja\_in\_rast =  $+dt \cdot \text{Tedenski\_stroški\_obnavljanja\_in\_rasti}$   
 doc Stroški\_za\_obnavljanja\_in\_rast = Stroški, ki nastanejo skozi simulirano obdobje zaradi obnovitev voznega parka.  
 init Vozila\_na\_preventivnem\_vzdrževanju = 0  
 flow Vozila\_na\_preventivnem\_vzdrževanju =  $+dt \cdot \text{Stopnja\_preventivnega\_vzdrževanja}$   
 $-dt \cdot \text{Opravljeni\_tedenski\_preventivni\_vzdrževanja}$   
 doc Vozila\_na\_preventivnem\_vzdrževanju = Količina vozil, ki so v postopku preventivnega vzdrževanja, zato v tem trenutku niso sposobna za vožnjo.  
 init Vozila\_v\_okvari = 0  
 flow Vozila\_v\_okvari =  $+dt \cdot \text{Stopnja\_okvar\_vozil}$   
 $-dt \cdot \text{Opravljeni\_tedenski\_popravila}$   
 doc Vozila\_v\_okvari = Količina vozil, ki so v okvari, zato v tem trenutku niso sposobna za vožnjo.  
 aux Opravljeni\_tedenski\_popravila =  $\text{MIN}(\text{Vozila\_v\_okvari}/\text{Dolžina\_popravila}, \text{Skupna\_kapaciteta})$   
 doc Opravljeni\_tedenski\_popravila = Število popravil, ki jih opravijo vzdrževalci v enem tednu  
 aux Opravljeni\_tedenski\_preventivni\_vzdrževanja =  $\text{Vozila\_na\_preventivnem\_vzdrževanju}/\text{Dolžina\_preventivnega\_vzdrževanja}$   
 doc Opravljeni\_tedenski\_preventivni\_vzdrževanja = Opravljeni preventivni vzdrževanja  
 aux Stopnja\_obnavljanja =  $\text{Strategija\_obnovitev}/52$   
 doc Stopnja\_obnavljanja = Tedenska stopnja nabave vozil, preračunana iz zaželjene dinamike obnovitve.  
 aux Stopnja\_odplačevanja =  $\text{Neodplačana\_vozila}/\text{Odplačilna\_doba}$   
 doc Stopnja\_odplačevanja = Stopnja, po kateri se izplačujejo vozila.  
 aux Stopnja\_odpovedi\_izkušenih =  $\text{Izkušeni\_vzdrževalci} \cdot \text{Delež\_odpovedi\_izkušenih}$   
 doc Stopnja\_odpovedi\_izkušenih = Stopnja, po kateri izkušeni delavci zapuščajo podjetje.  
 aux Stopnja\_odpovedi\_novincev =  $\text{Novinci} \cdot \text{Delež\_odpovedi\_novincev}$   
 doc Stopnja\_odpovedi\_novincev = Stopnja, po kateri novinci zapuščajo podjetje

aux Stopnja\_okvar\_vozil =  
IF(Razpoložljiva\_vozila>Stopnja\_okvar\_vozil\_nova+Stopnja\_okvar\_vozil\_solidna+  
Stopnja\_okvar\_vozil\_starejša+Stopnja\_okvar\_vozil\_najstarejša,  
Stopnja\_okvar\_vozil\_nova+Stopnja\_okvar\_vozil\_solidna+Stopnja\_okvar\_vozil\_star  
ejša+Stopnja\_okvar\_vozil\_najstarejša, Razpoložljiva\_vozila)

aux Stopnja\_preventivnega\_vzdrževanja =  
MIN(Zaželjena\_tedensko\_število\_vzdrževanj\_na\_vozilo\*Skupno\_število\_vozil,  
Kapaciteta\_preventivnega\_vzdrževanja)

doc Stopnja\_preventivnega\_vzdrževanja = Število vozil, ki jih pošljemo na  
preventivno vzdrževanje na teden.

aux Stopnja\_rasti\_voznega\_parka = Rast/52

doc Stopnja\_rasti\_voznega\_parka = Tedenska stopnja rasti voznega parka.

aux Stopnja\_staranja\_1 = Nova\_vozila/260

doc Stopnja\_staranja\_1 = Stopnja, po kateri prehajajo vozila v slabši razred, v 5  
letih (5\*52).

aux Stopnja\_staranja\_2 = Solidna\_vozila/260

doc Stopnja\_staranja\_2 = Stopnja, po kateri prehajajo vozila v slabši razred.

aux Stopnja\_staranja\_3 = Starejša\_vozila/260

doc Stopnja\_staranja\_3 = Stopnja, po kateri prehajajo vozila v slabši razred.

aux Stopnja\_uvajanja = Novinci/Uvajalna\_doba

doc Stopnja\_uvajanja = Stopnja, po kateri novinci prehajajo med izkušene  
delavce.

aux Stopnja\_zamenjave\_najstarejših = MIN(Najstarejša\_vozila/52,  
Stopnja\_obnavljanja+Manjšanje/52 )

doc Stopnja\_zamenjave\_najstarejših = Stopnja po kateri opuščamo vozila iz  
najslabšega razreda, omejena maksimalnim številom vozil v razredu

aux Stopnja\_zamenjave\_novih = MIN(Stopnja\_obnavljanja+Manjšanje/52-  
Stopnja\_zamenjave\_najstarejših-Stopnja\_zamenjave\_starejših-  
Stopnja\_zamenjave\_solidnih, Nova\_vozila /52)

doc Stopnja\_zamenjave\_novih = Stopnja, po kateri izločamo vozila iz razreda  
novih vozil. Nastopi le če v slabših razredih ni toliko vozil, kot jih nabavimo.  
Praktično to nima smisla.

aux Stopnja\_zamenjave\_solidnih = MIN(Stopnja\_obnavljanja+Manjšanje/52-  
Stopnja\_zamenjave\_najstarejših-Stopnja\_zamenjave\_starejših, Solidna\_vozila/52)

doc Stopnja\_zamenjave\_solidnih = Stopnja po kateri izločamo iz razreda  
solidnih vozil, pod pogojem, da smo že izpraznili slabša razreda

aux Stopnja\_zamenjave\_starejših = MIN(Stopnja\_obnavljanja+Manjšanje/52-  
Stopnja\_zamenjave\_najstarejših, Starejša\_vozila/52)

doc Stopnja\_zamenjave\_starejših = Stopnja, po kateri zamenjujemo vozila iz  
razreda starejših vozil, aktivira se, ko je vozil v najslabšem razredu manj kot  
nabavimo novih.

aux Stopnja\_zaposlovanja = Dinamika\_zaposlovanja/52

doc Stopnja\_zaposlovanja = Stopnja zaposlovanja nam poda vrednost  
zaposlovanja na teden glede na naš letni načrt.

aux Tedenski\_prihodki =  
MIN(Razpoložljiva\_vozila\*Tedenski\_prihodek\_vozila,Zunanje\_povpraševanje\*Tede  
nski\_prihodek\_vozila)

doc Tedenski\_prihodki = Prihodki, ki jih ustvarimo v enem tednu na osnovi  
razpoložljivih vozil.

aux Tedenski\_stroški\_obnavljanja\_in\_rasti =  
Neodplačana\_vozila\*Cena\_vozila/Odplačilna\_doba

doc Tedenski\_stroški\_obnavljanja\_in\_rasti = Tedenski stroški, ki nastanejo zaradi obnovitev in rasti voznega parka.

aux Tedenski\_stroški\_popravlil =  
Opravljenatjedenskapopravila\*Strošekpopravila

doc Tedenski\_stroški\_popravlil = Stroški popravil, ki nastanejo v enem tednu.

aux Tedenski\_stroški\_prevencije =  
Opravljenatjedenskapreventivnavzdrževanja\*Strošekpreventivnavzdrževanja

doc Tedenski\_stroški\_prevencije = Stroški preventivnih posegov, ki nastanejo v enem tednu.

aux Tedenski\_stroški\_vzdrževalcev =  
Novinci\*Tedenski\_strošek\_za\_novinca+Izkušeni\_vzdrževalci\*Rast\_stroškov\_za\_izkušene

doc Tedenski\_stroški\_vzdrževalcev = Skupni stroški, ki nastanejo z vzdrževalci v enem tednu.

aux Cena\_vozila = Začetnacena\_vozila\*(1+TIME\*(Nominalnaraścen/52))

doc Cena\_vozila = Cena vozila ob upoštevanju obrestne mere.

aux Dejansko\_število\_vzdrževanj\_na\_vozilo =  
Opravljenatjedenskapreventivnavzdrževanja\*52/Skupno\_število\_vozil

doc Dejansko\_število\_vzdrževanj\_na\_vozilo = Dejansko število preventivnih vzdrževanj na eno vozilo na leto.

aux Delež\_novincev = Novinci/Vsi\_zaposleni

doc Delež\_novincev = Delež novincev v skupnem številu delavcev

aux Delež\_okvar\_na\_vozila\_najstarejša = (8/52)\*Korekcija\_okvar\_zaradi\_cene

doc Delež\_okvar\_na\_vozila\_najstarejša = Delež najstarejših vozil, ki se okvarijo tedensko

aux Delež\_okvar\_na\_vozila\_najstarejša\_po\_prevenaciji =  
Delež\_okvar\_na\_vozila\_najstarejša\*(1+DELAYINF(Korekcija\_okvar\_zaradi\_prevenacije\_najstarejša, Zamik\_učinka\_prevenacije))

doc Delež\_okvar\_na\_vozila\_najstarejša\_po\_prevenaciji = Delež najstarejših vozil, ki se okvarijo tedensko, spremenjen za korekcijski faktor, ki nastane pod vplivom dejanskega števila preventivnih posegov in ob upoštevanju časovnega zamika v katerem doseže prevencija svoj učinek.

aux Delež\_okvar\_na\_vozila\_starejša = (4/52)\*Korekcija\_okvar\_zaradi\_cene

doc Delež\_okvar\_na\_vozila\_starejša = Delež starejših vozil, ki se okvarijo tedensko.

aux Delež\_okvar\_na\_vozila\_starejša\_po\_prevenaciji =  
Delež\_okvar\_na\_vozila\_starejša\*(1+DELAYINF(Korekcija\_okvar\_zaradi\_prevenacije\_starejša, Zamik\_učinka\_prevenacije))

doc Delež\_okvar\_na\_vozila\_starejša\_po\_prevenaciji = Delež starejših vozil, ki se okvarijo tedensko, spremenjen za korekcijski faktor, ki nastane pod vplivom dejanskega števila preventivnih posegov in ob upoštevanju časovnega zamika, v katerem doseže prevencija svoj učinek.

aux Delež\_okvar\_na\_vozilo\_nova = (1/52)\*Korekcija\_okvar\_zaradi\_cene

doc Delež\_okvar\_na\_vozilo\_nova = Delež novih vozil, ki se okvarijo tedensko.

aux Delež\_okvar\_na\_vozilo\_nova\_po\_prevenaciji =  
Delež\_okvar\_na\_vozilo\_nova\*(1+DELAYINF(Korekcija\_okvar\_zaradi\_prevenacije\_nova, Zamik\_učinka\_prevenacije))

doc Delež\_okvar\_na\_vozilo\_nova\_po\_prevenaciji = Delež novih vozil, ki se okvarijo tedensko, spremenjen za korekcijski faktor, ki nastane pod vplivom

dejanskega števila preventivnih posegov in ob upoštevanju časovnega zamika, v katerem doseže prevencija svoj učinek.

aux Delež\_okvar\_na\_vozilo\_solidna = (2/52)\*Korekcija\_okvar\_zaradi\_cene

doc Delež\_okvar\_na\_vozilo\_solidna = Delež solidnih vozil, ki se okvarijo tedensko.

aux Delež\_okvar\_na\_vozilo\_solidna\_po\_prevenziji =

Delež\_okvar\_na\_vozilo\_solidna\*(1+DELAYINF(Korekcija\_okvar\_zaradi\_prevenzije\_solidna, Zamik\_učinka\_prevenzije))

doc Delež\_okvar\_na\_vozilo\_solidna\_po\_prevenziji = Delež solidnih vozil, ki se okvarijo tedensko, spremenjen za korekcijski faktor, ki nastane pod vplivom dejanskega števila preventivnih posegov in ob upoštevanju časovnega zamika, v katerem doseže prevencija svoj učinek.

aux Dinamika\_zaposlovanja =

Strategija\_zaposlovanja+Korekcija\_zaradi\_prostih\_kapacitet

doc Dinamika\_zaposlovanja = Zaposlovanje po korekciji zaradi neustreznih kapacitet.

aux Izkoristek\_vzdrževalcev = (Skupna\_kapaciteta-

Prosta\_kapaciteta)/Skupna\_kapaciteta

doc Izkoristek\_vzdrževalcev = Pove nam, kolikšen je izkoristek razpoložljive delovne sile.

aux Kapaciteta\_preventivnega\_vzdrževanja = (Skupna\_kapaciteta-

Opravljen\_tedenska\_popravila)\*(Dolžina\_popravila/Dolžina\_preventivnega\_vzdrževanja)

doc Kapaciteta\_preventivnega\_vzdrževanja = Kapaciteta preventivnega vzdrževanja nam pove, kolikšno kapaciteto imamo na razpolago za preventivno vzdrževanje. Odvisna je od celotne kapacitete, od katere odštejemo kapaciteto, ki jo potrebujemo za odpravljanje okvar na vozilih.

aux Korekcija\_okvar\_zaradi\_cene =

GRAPH(Začetna\_cena\_vozila,20000,10000,[1.5,1.35,1.25,1.16,1.08,1.04,1,0.98,0.94,0.92,0.9"Min:0.5;Max:2"])

doc Korekcija\_okvar\_zaradi\_cene = Korekcijski faktor, ki vpliva na delež okvar in je odvisen od cene vozil.

aux Korekcija\_okvar\_zaradi\_prevenzije\_najstarejša =

GRAPH(Dejansko\_število\_vzdrževanj\_na\_vozilo,0,1,[0.55,0,-0.2,-0.28,-0.36,-0.45,-0.5,-0.51,-0.52,-0.53,-0.54"Min:-1;Max:1"])

doc Korekcija\_okvar\_zaradi\_prevenzije\_najstarejša = Korekcija okvar zaradi vpliva preventivnega vzdrževanja pri najstarejših vozilih.

aux Korekcija\_okvar\_zaradi\_prevenzije\_nova =

GRAPH(Dejansko\_število\_vzdrževanj\_na\_vozilo,0,1,[0.25,0,-0.2,-0.28,-0.36,-0.45,-0.5,-0.51,-0.52,-0.53,-0.54"Min:-1;Max:1"])

doc Korekcija\_okvar\_zaradi\_prevenzije\_nova = Korekcija okvar zaradi vpliva preventivnega vzdrževanja pri novih vozilih

aux Korekcija\_okvar\_zaradi\_prevenzije\_solidna =

GRAPH(Dejansko\_število\_vzdrževanj\_na\_vozilo,0,1,[0.35,0,-0.2,-0.28,-0.36,-0.45,-0.5,-0.51,-0.52,-0.53,-0.54"Min:-1;Max:1"])

doc Korekcija\_okvar\_zaradi\_prevenzije\_solidna = Korekcija okvar zaradi vpliva preventivnega vzdrževanja pri solidnih vozilih.

aux Korekcija\_okvar\_zaradi\_prevenzije\_starejša =

GRAPH(Dejansko\_število\_vzdrževanj\_na\_vozilo,0,1,[0.45,0,-0.2,-0.28,-0.36,-0.45,-0.5,-0.51,-0.52,-0.53,-0.54"Min:-1;Max:1"])

doc Korekcija\_okvar\_zaradi\_prevenције\_starejša = Korekcija okvar zaradi vpliva preventivnega vzdrževanja pri starejših vozilih

aux Korekcija\_zaradi\_prostih\_kapacitet = DELAYINF(Zaznana\_potreba\_po\_korekcij, Reakcijska\_doba\_v)

aux Manjšanje = ABS(MIN(Spremembe\_voznega\_parka,0))

doc Manjšanje = Letna stopnja, po kateri želimo, da se vozni park manjša.

aux Povprečna\_kapaciteta = Skupna\_kapaciteta/Vsi\_zaposleni

doc Povprečna\_kapaciteta = Povprečna produktivnost.

aux Povprečna\_starost = (Nova\_vozila\*2.5+Solidna\_vozila\*7.5+Starejša\_vozila\*12.5+Najstarejša\_vozila\*17.5)/(Nova\_vozila+Solidna\_vozila+Starejša\_vozila+Najstarejša\_vozila)

doc Povprečna\_starost = Povprečna starost celotnega voznega parka.

aux Prosta\_kapaciteta = Skupna\_kapaciteta-Opravljen\_tedenski\_popravila-(Opravljen\_tedenski\_preventivni\_vzdrževanja\*Dolžina\_preventivnega\_vzdrževanja/Dolžina\_popravila)

doc Prosta\_kapaciteta = Popravila, ki bi jih vzdrževalci še lahko opravili v posameznem tednu.

aux Rast = MAX(Spremembe\_voznega\_parka,0)

doc Rast = Letna stopnja, po kateri želimo, da raste vozni park.

aux Rast\_stroškov\_za\_izkušene = Začetni\_stroški\_za\_izkušene\*(1+TIME\*(Nominalna\_rast\_cen/52))

doc Rast\_stroškov\_za\_izkušene = Tedenski stroški na enega izkušenega vzdrževalca ob upoštevanju obrestne mere.

aux Razpoložljiva\_vozila = MAX(Skupno\_število\_vozil-Vozila\_v\_okvari-Vozila\_na\_preventivnem\_vzdrževanju,0)

doc Razpoložljiva\_vozila = Vozila, ki so na razpolago za opravljanje nalog.

aux Razpoložljivost = Razpoložljiva\_vozila/Skupno\_število\_vozil

doc Razpoložljivost = Razmerje med skupnim razpoložljivimi vozili in skupnim številom vozil.

aux Reakcijska\_doba\_v = Reakcijska\_doba\_v

doc Reakcijska\_doba\_v = Čas, ki ga potrebujemo za reakcijo, po tem ko zaznamo proste kapacitete. Zaradi poenostavitve predpostavimo, da je enak kot čas za reakcijo pri izravnavanju kapacitet s ponudbo.

aux Skupna\_kapaciteta = Kapaciteta\_izkušenih\*(Kapaciteta\_novincev\*Novinci + Izkušeni\_vzdrževalci)

doc Skupna\_kapaciteta = Skupno število dela, ki ga lahko opravijo delavci.

aux Skupna\_stopnja\_odpovedi = Stopnja\_odpovedi\_izkušenih+Stopnja\_odpovedi\_novincev

doc Skupna\_stopnja\_odpovedi = Skupna stopnja odpovedi, vključuje tako izkušene kot novince.

aux Skupno\_število\_vozil = Nova\_vozila+Solidna\_vozila+Starejša\_vozila+Najstarejša\_vozila

doc Skupno\_število\_vozil = Skupno število vozil, ki jih imamo na razpolago, so seštevek vozil po posameznih razredih.

aux Spremembe\_voznega\_parka = DELAYINF(Zaznana\_neustreznost\_št\_vozil,Reakcijska\_doba\_v)

doc Spremembe\_voznega\_parka = Funkcija, ki uravnava povpraševanje in kapaciteto z določenim zamikom, ki je upoštevan z reakcijsko dobo.

aux Stopnja\_okvar\_vozil\_najstarejša = Najstarejša\_vozila\*Razpoložljivost\*Delež\_okvar\_na\_vozila\_najstarejša\_po\_preven

ciji





doc Dolžina\_popravila = Čas, ki je potreben, da popravimo eno vozilo, ki je v okvari.  
 const Dolžina\_preventivnega\_vzdrževanja = 1/3  
 doc Dolžina\_preventivnega\_vzdrževanja = Čas, ki ga potrebujemo, da izvedemo eno preventivno vzdrževanje.  
 const Kapaciteta\_izkušenih = 1  
 doc Kapaciteta\_izkušenih = Kapaciteta izkušenih delavcev.  
 const Kapaciteta\_novincev = 0.4  
 doc Kapaciteta\_novincev = Kapaciteta novincev.  
 const Nominalna\_rast\_cen = 0.02  
 doc Nominalna\_rast\_cen = Predvidena rast cen, ki bo vplivala na podražitve aktivnosti skozi potek izvajanja simulacije.  
 const Odplačilna\_doba = 52  
 doc Odplačilna\_doba = Čas, v katerem odplačamo vozilo.  
 const Reakcijska\_doba\_ = 52  
 doc Reakcijska\_doba\_ = Čas, ki je potreben, da prilagodimo vozni park, po tem ko je zaznana razlika med povpraševanjem in kapaciteto.  
 const Start\_najstarejša = 10  
 doc Start\_najstarejša = Začetno stanje najstarejših vozil.  
 const Start\_nova = 10  
 doc Start\_nova = Začetno stanje novih vozil.  
 const Start\_solidna = 40  
 doc Start\_solidna = Začetno stanje solidnih vozil.  
 const Start\_starejša = 40  
 doc Start\_starejša = Začetno stanje starejših vozil.  
 const Strategija\_obnovitev = 0  
 doc Strategija\_obnovitev = Načrt obnovitve voznega parka, izražen s številom vozil, ki jih bomo letno zamenjali.  
 const Strategija\_preventivnega\_vzdrževanja = 0  
 doc Strategija\_preventivnega\_vzdrževanja = Število vzdrževanj, ki jih želimo letno izvesti na enem vozilu.  
 const Strategija\_zaposlovanja = 0  
 doc Strategija\_zaposlovanja = Letni načrt zaposlovanja, število novincev, ki bi jih naj vsako leto zaposlili.  
 const Uvajalna\_doba = 52  
 doc Uvajalna\_doba = Povprečen čas, ki je potreben, da novinec postane izkušen delavec.  
 const Začetna\_cena\_vozila = 80000  
 doc Začetna\_cena\_vozila = Cena novega vozila v začetku simuliranega obdobja.  
 const Začetni\_strošek\_popravila = 1500  
 doc Začetni\_strošek\_popravila = Strošek enega popravila (povprečni) v trenutku začetka izvajanja simulacije.  
 const Začetni\_strošek\_preventivnega\_vzdrževanja = 300  
 doc Začetni\_strošek\_preventivnega\_vzdrževanja = Strošek enega vzdrževalnega posega (povprečni) v trenutku začetka izvajanja simulacije.  
 const Začetni\_stroški\_za\_izkušenega = 300  
 doc Začetni\_stroški\_za\_izkušenega = Tedenska plača izkušenega vzdrževalca v začetku izvajanja simulacije.  
 const Začetni\_stroški\_za\_novinca = 200

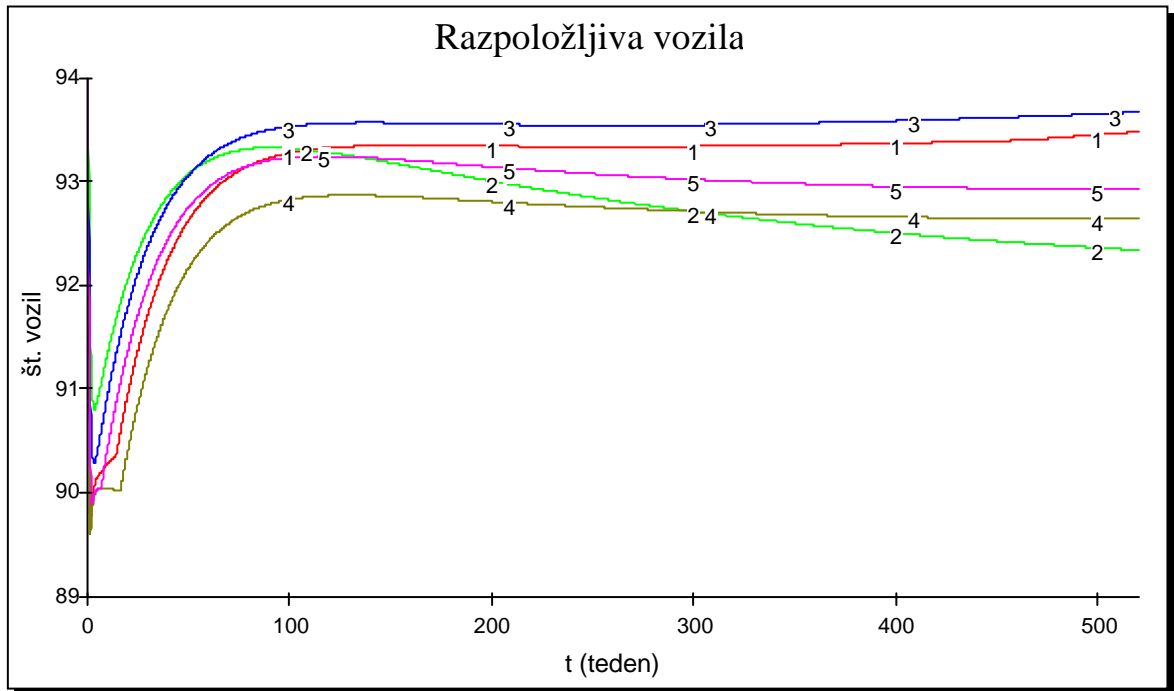
```
doc  Začetni_stroški_za_novinca = Tedenska plača novinca v začetku izvajanja
simulacije.
const Začetni_tedenski_prihodek_vozila = 500
doc  Začetni_tedenski_prihodek_vozila = Tedenski prihodek enega vozila v
začetku simuliranega obdobja.
const Zamik_učinka_prevencije = 52
doc  Zamik_učinka_prevencije = Čas, ki je potreben, da preventivni posegi
učinkujejo.
```

Opomba- kratice imajo naslednji pomen:

init - začetna vrednost nivoja,  
flow - pretok v nivoju,  
aux - spremenljivka,  
const - konstanta,  
doc - opis parametra.

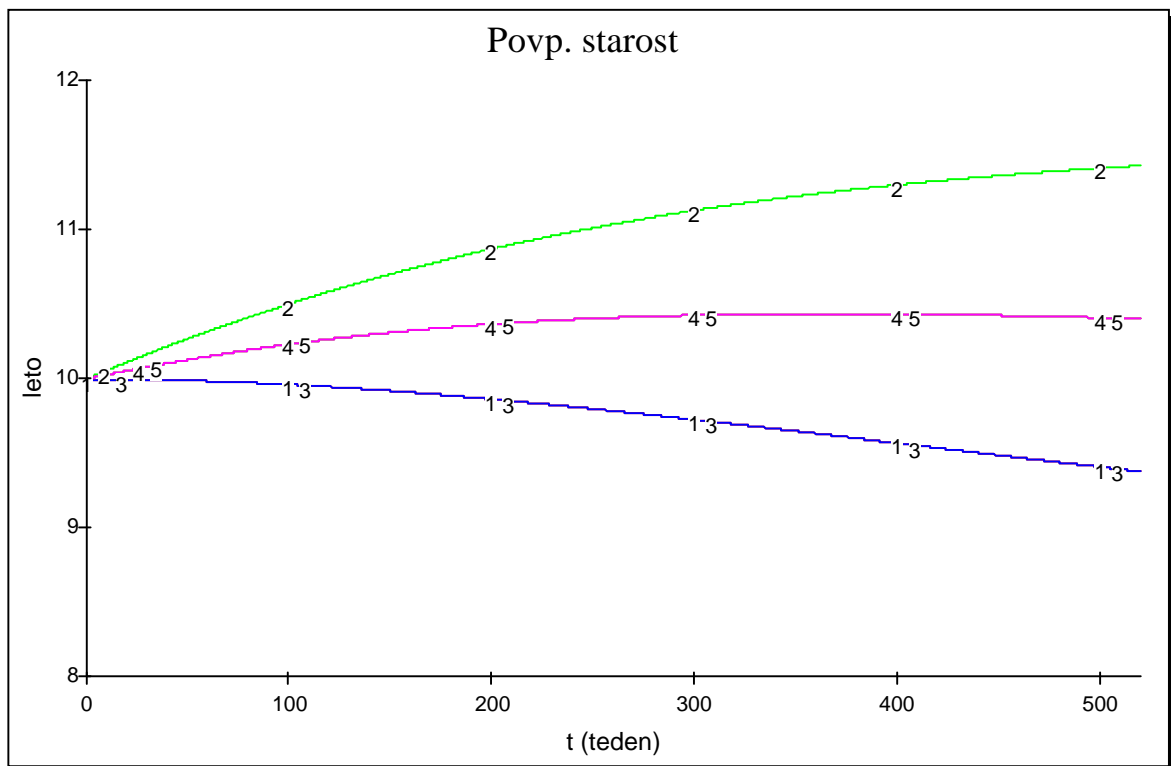
## Priloga 2: Diagrami najboljših petih strategij pri osnovni simulaciji

Slika 2.1: Razpoložljiva vozila



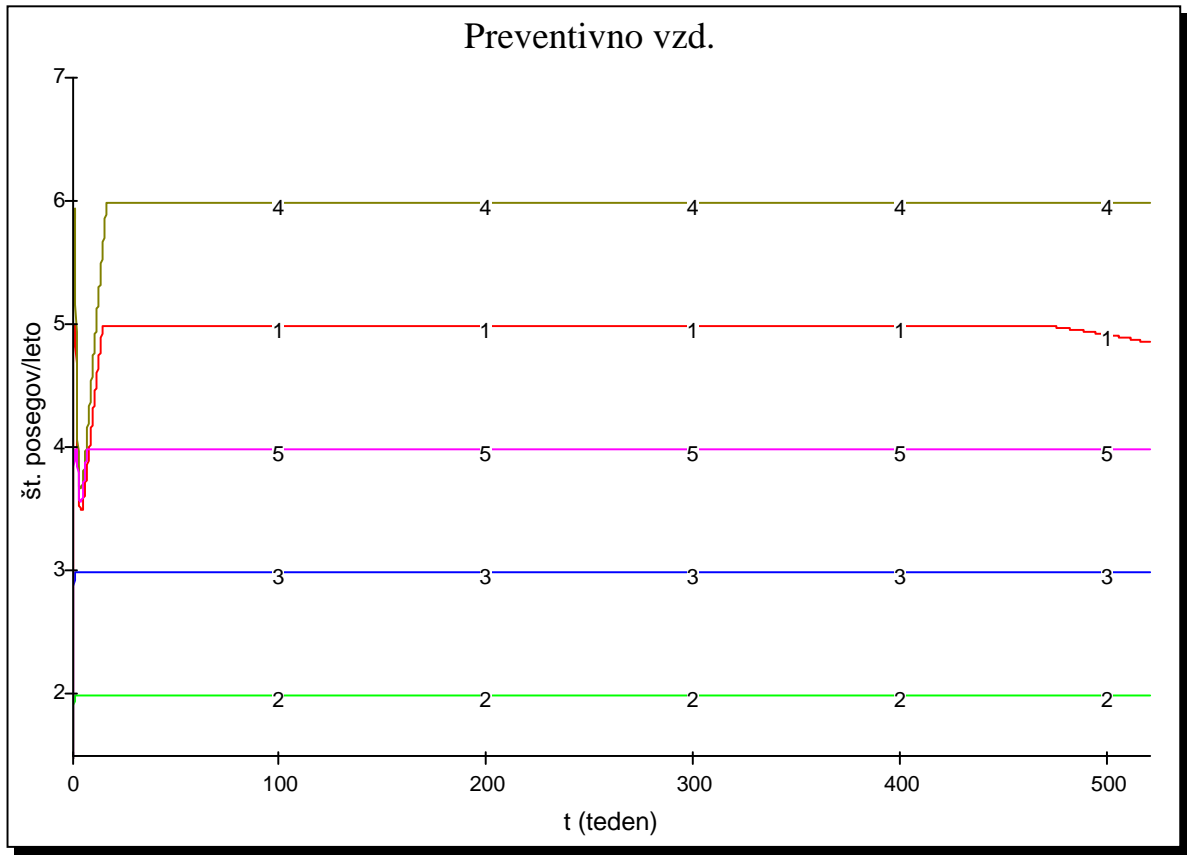
vir: Lastna simulacija

Slika 2.2: Povprečna starost vozil



vir: Lastna simulacija

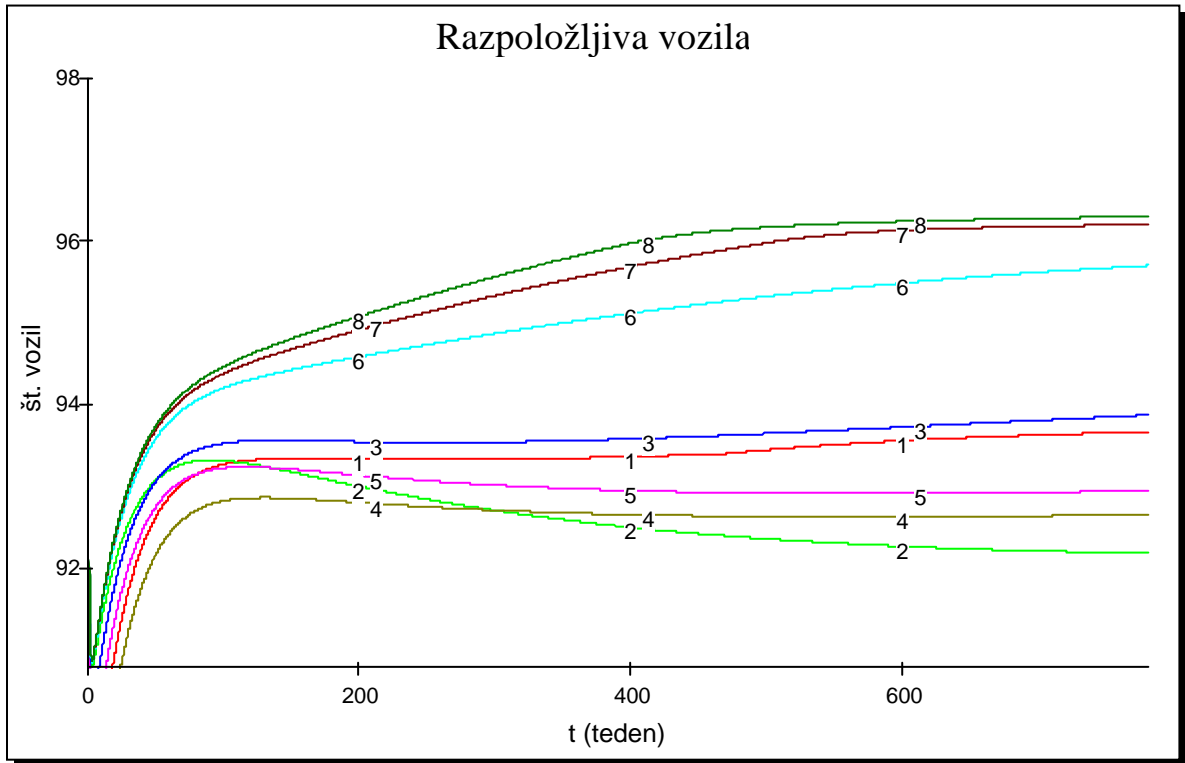
Slika 2.3: Doseganje načrta preventivnega vzdrževanja



vir: Lastna simulacija

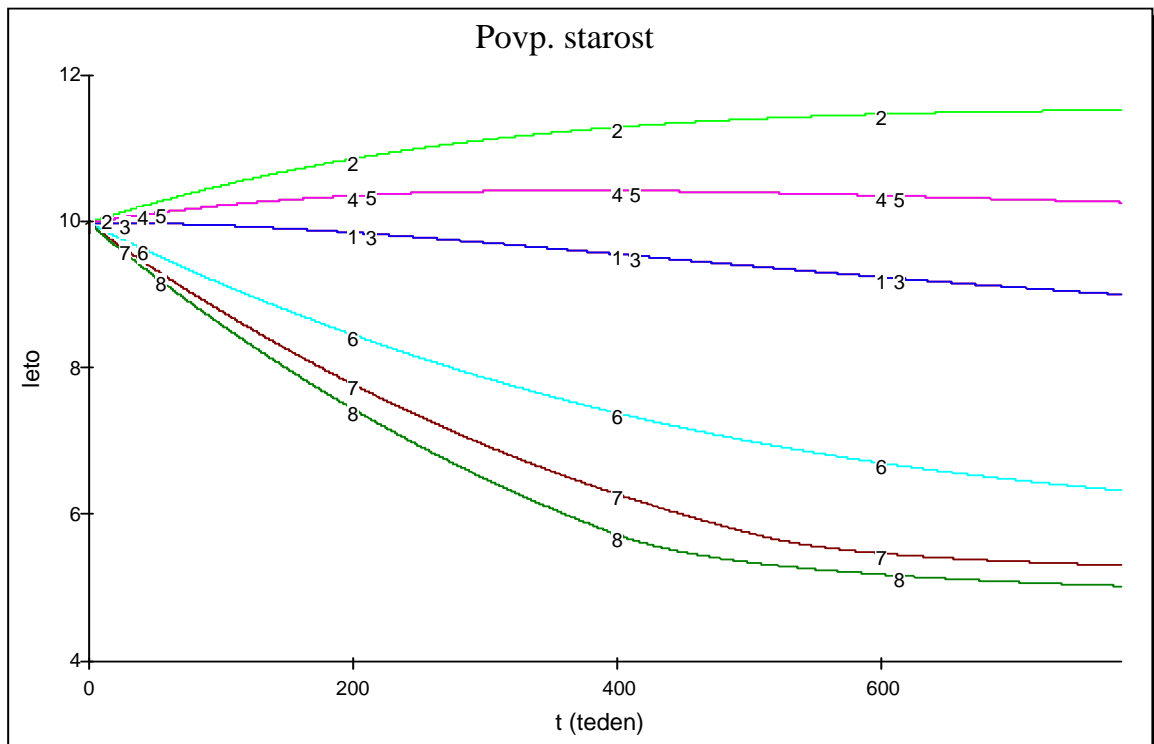
### Priloga 3: Diagrami najboljših petih strategij pri podaljšanem času simulacije

Slika 3.1: Razpoložljiva vozila



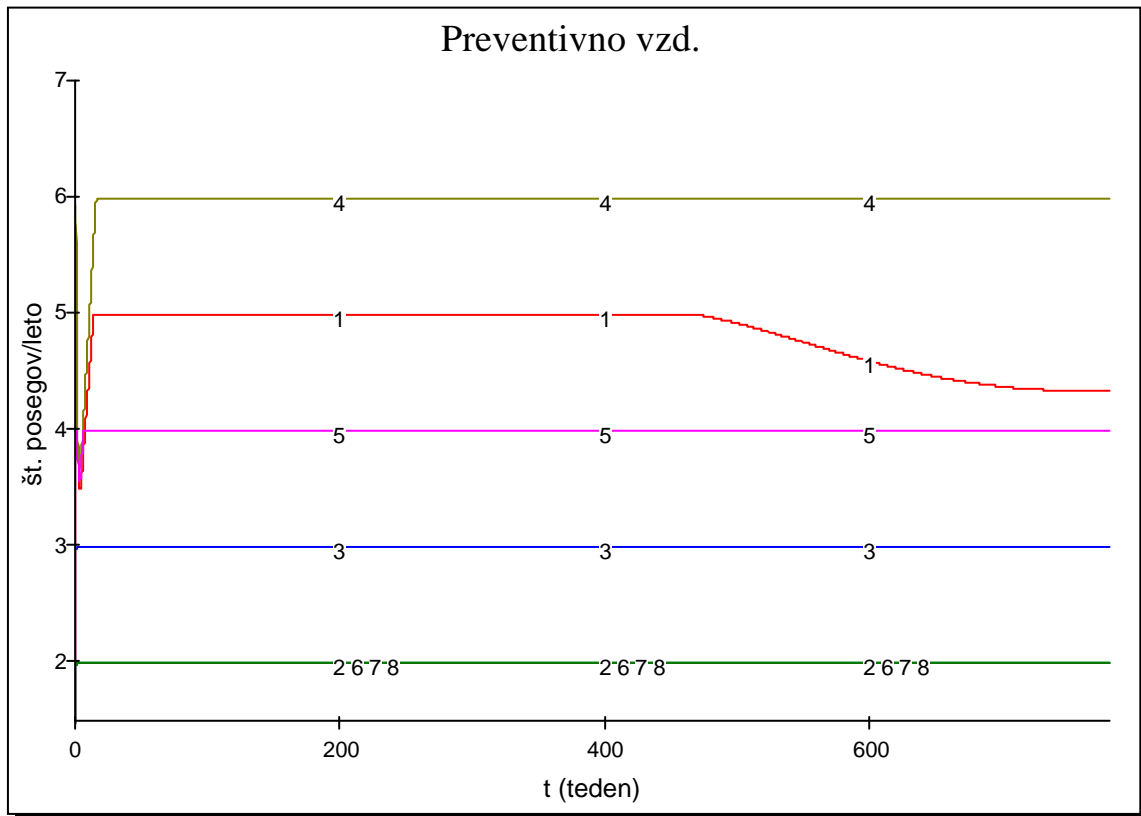
vir: Lastna simulacija

Slika 3.2: Povprečna starost vozil



vir: Lastna simulacija

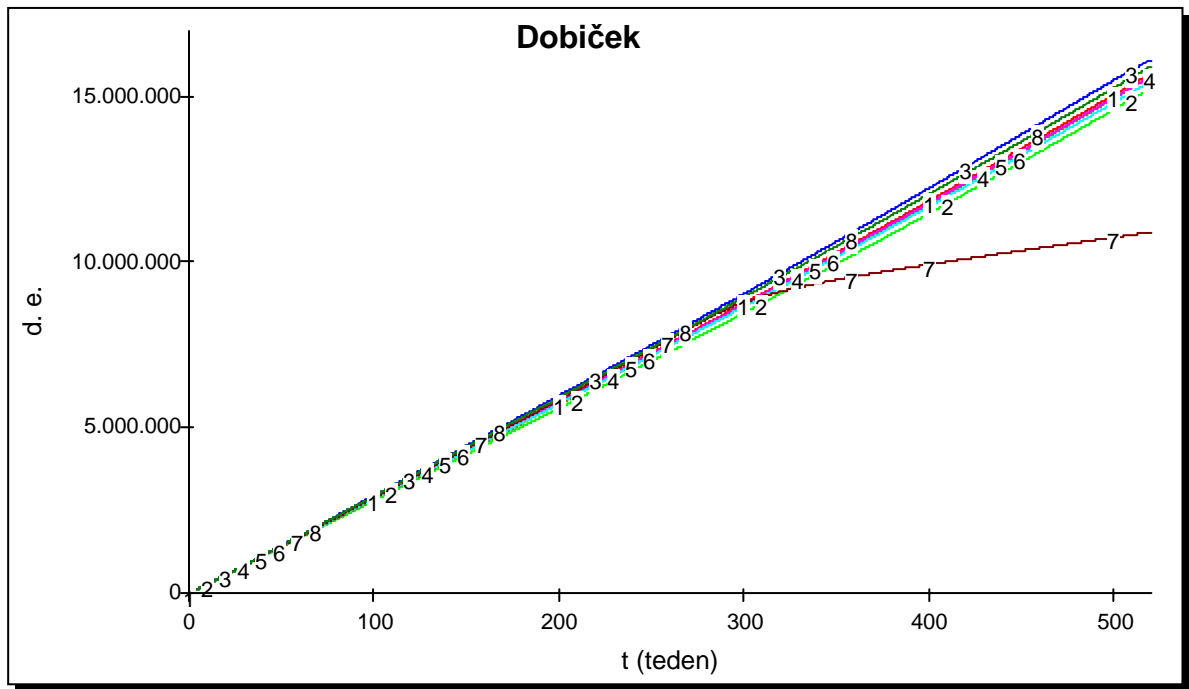
Slika 3.3: Doseganje načrta preventivnega vzdrževanja



vir: Lastna simulacija

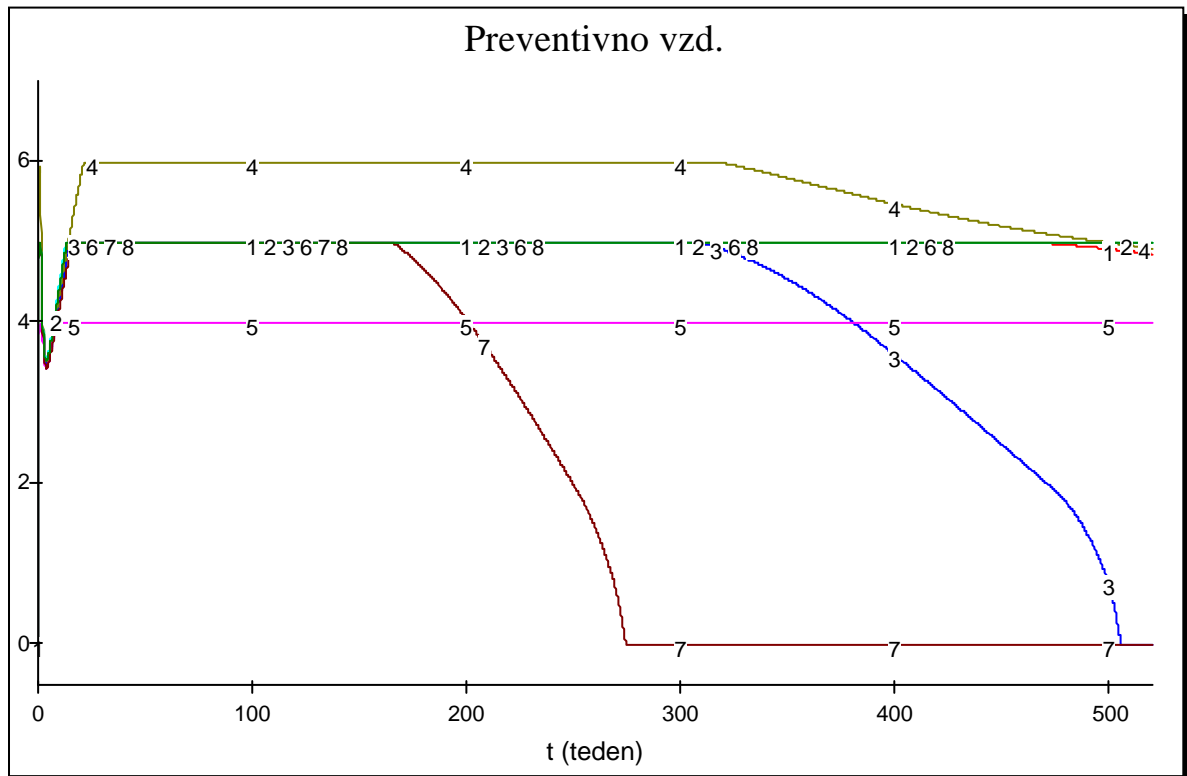
## Priloga 4: Občutljivostna analiza spremembe parametrov

Slika 4.1: Dobiček



vir: Lastna simulacija

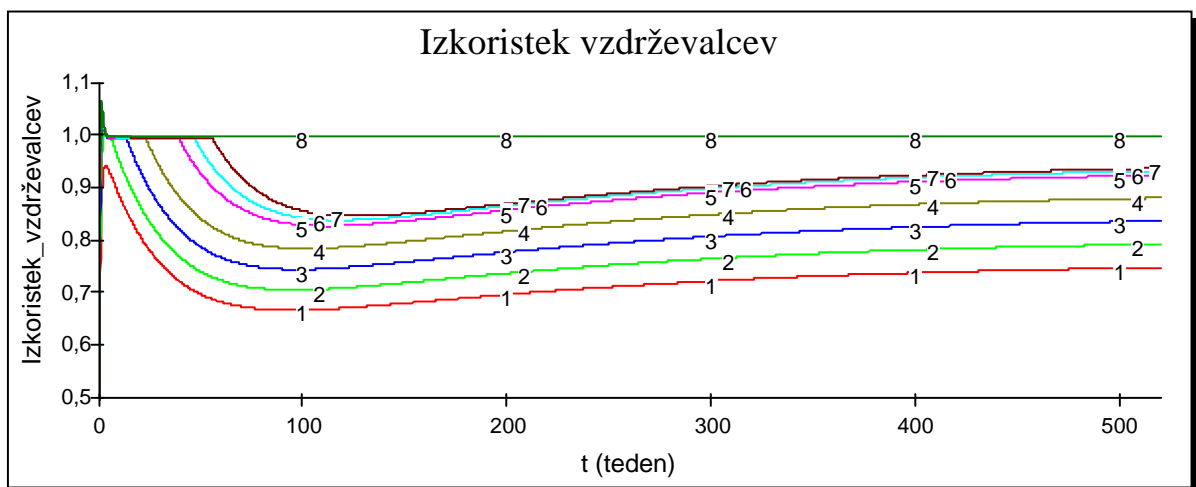
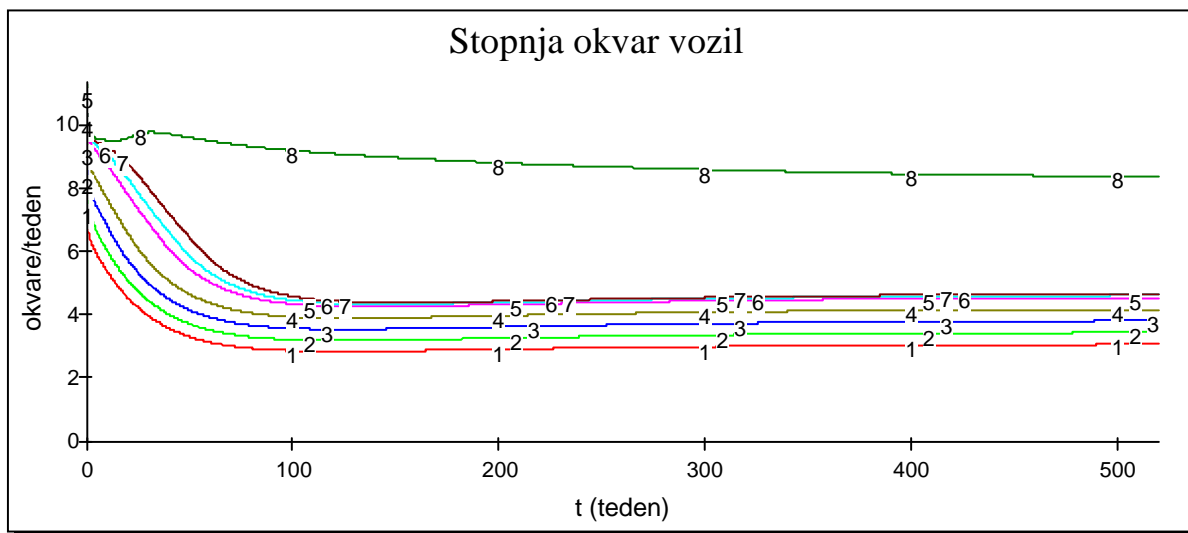
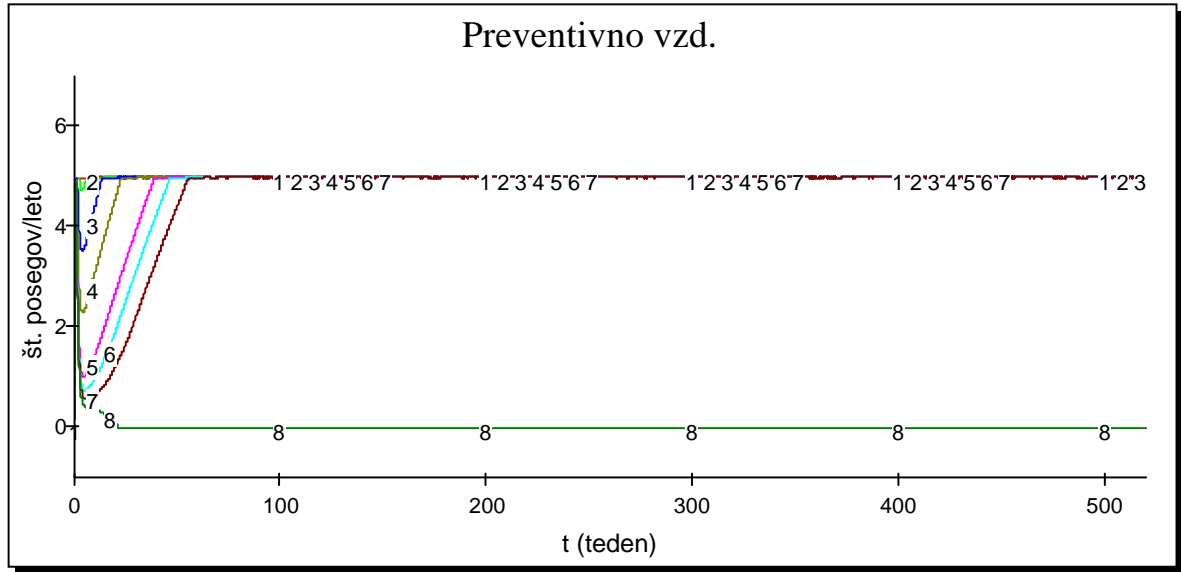
Slika 4.2: Doseganje načrta preventivnega vzdrževanja



vir: Lastna simulacija

## Priloga 5: Občutljivostna analiza deleža okvar

Slika 5.1: Preventivno vzdrževanje, stopnja okvar in izkoristek vzdrževalcev



vir: Lastna simulacija



## Priloga 6: Analiza odvisnosti povprečne starosti od strategije obnavljanja

Tabela 6.1: Izračun koeficienta korelacije

Strategija obnovitve	Povp.starost					
$x$	$y$	$x - \bar{x}$	$y - \bar{y}$	$(x - \bar{x})^2$	$(y - \bar{y})^2$	$(x - \bar{x}) * (y - \bar{y})$
1	14,51	-9,5	7,256	90,25	52,64954	-68,932
2	13,49	-8,5	6,236	72,25	38,8877	-53,006
3	12,46	-7,5	5,206	56,25	27,10244	-39,045
4	11,43	-6,5	4,176	42,25	17,43898	-27,144
5	10,41	-5,5	3,156	30,25	9,960336	-17,358
6	9,38	-4,5	2,126	20,25	4,519876	-9,567
7	8,35	-3,5	1,096	12,25	1,201216	-3,836
8	7,59	-2,5	0,336	6,25	0,112896	-0,84
9	6,59	-1,5	-0,664	2,25	0,440896	0,996
10	6,32	-0,5	-0,934	0,25	0,872356	0,467
11	5,68	0,5	-1,574	0,25	2,477476	-0,787
12	5,32	1,5	-1,934	2,25	3,740356	-2,901
13	5,06	2,5	-2,194	6,25	4,813636	-5,485
14	4,8	3,5	-2,454	12,25	6,022116	-8,589
15	4,54	4,5	-2,714	20,25	7,365796	-12,213
16	4,28	5,5	-2,974	30,25	8,844676	-16,357
17	4,03	6,5	-3,224	42,25	10,39418	-20,956
18	3,77	7,5	-3,484	56,25	12,13826	-26,13
19	3,56	8,5	-3,694	72,25	13,64564	-31,399
20	3,51	9,5	-3,744	90,25	14,01754	-35,568
$\bar{x}$	$\bar{y}$			$\sigma_x^2$	$\sigma_y^2$	$C_{xy}$
10,5	7,254			33,25	11,83229	-18,9325

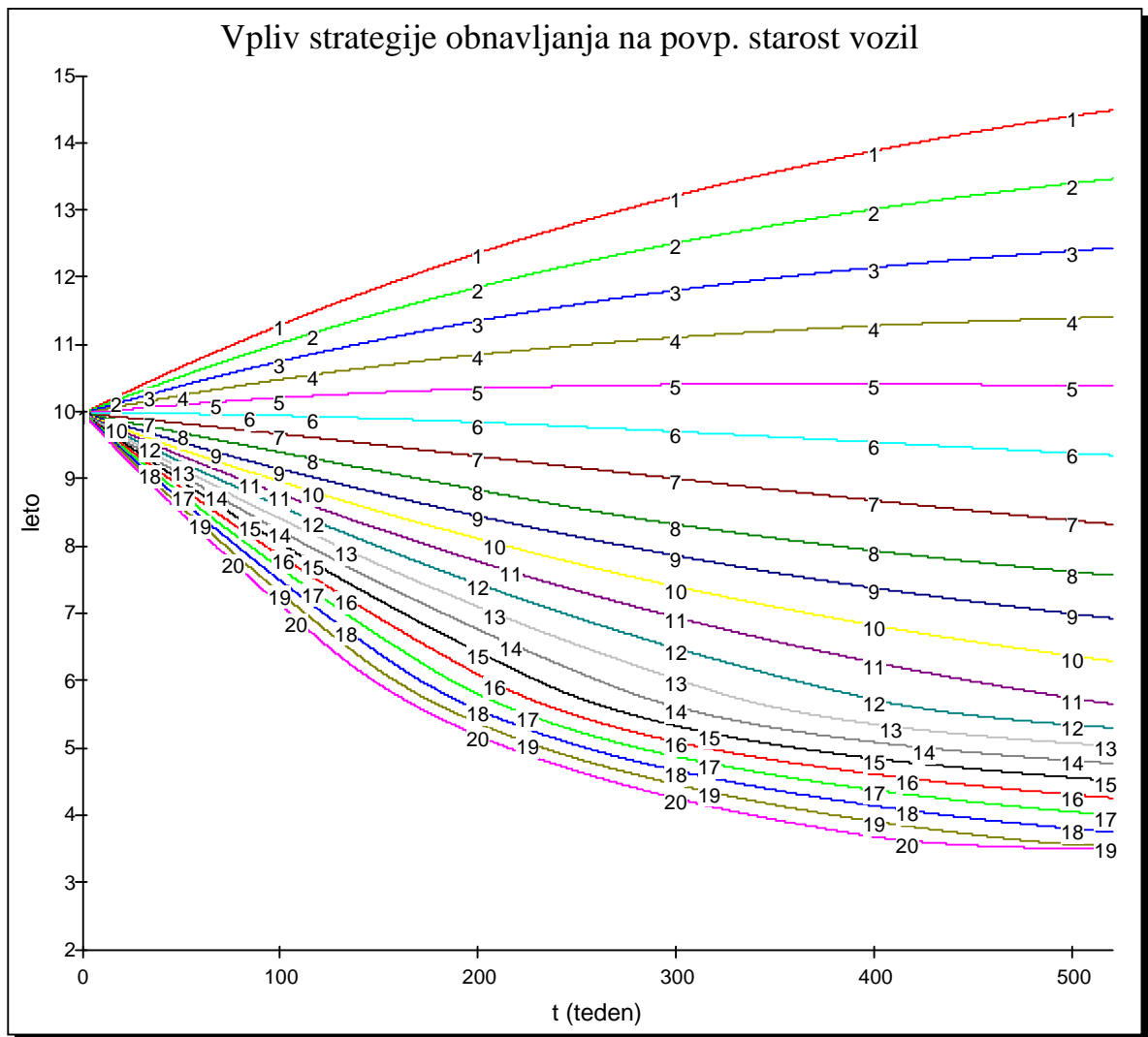
vir: Lasten izračun

$$C_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y}) \quad (6.1)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (6.2)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \quad (6.3)$$

Slika 6.1: Vpliv strategije obnavljanja na povprečno starost vozil



vir: Lastna simulacija

## Priloga 7: Izračun uteži kriterijem po metodi AHP

Primerjalna matrika A:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 7 & 7 & 9 & 9 & 9 \\ 1/7 & 1 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 1/7 & 1/3 & 1 & 1/2 & 3 & 2 \\ 1/9 & 1/3 & 2 & 1 & 3 & 3 \\ 1/9 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1 & 3 \\ 1/9 & 1/3 & 1/2 & 1/3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

Normalizirana matrika  $A_{norm}$ :

Normalizirano matriko želimo imeti zato, da bo vsota uteži enaka 1. V ta namen delimo vsak vnos v i-tem stolpcu z vsoto vseh vnosov v i-ti stolpec.

$$A_{norm} = \begin{bmatrix} 0,617 & 0,750 & 0,506 & 0,635 & 0,465 & 0,428 \\ 0,088 & 0,107 & 0,216 & 0,211 & 0,155 & 0,142 \\ 0,088 & 0,035 & 0,072 & 0,035 & 0,155 & 0,095 \\ 0,068 & 0,035 & 0,144 & 0,070 & 0,155 & 0,142 \\ 0,068 & 0,035 & 0,024 & 0,023 & 0,051 & 0,142 \\ 0,068 & 0,035 & 0,036 & 0,023 & 0,017 & 0,470 \end{bmatrix}$$

Določitev približka ocene uteži  $w$ :

$w_i$  je enak povprečju vnosov v i-to vrstico v normalizirani matriki.

$$w_1 = \frac{0,617 + 0,750 + 0,506 + 0,635 + 0,465 + 0,428}{6} = 0,57$$

$$w_2 = \frac{0,088 + 0,107 + 0,216 + 0,211 + 0,155 + 0,142}{6} = 0,15$$

$$w_3 = \frac{0,088 + 0,035 + 0,072 + 0,035 + 0,155 + 0,095}{6} = 0,08$$

$$w_4 = \frac{0,068 + 0,035 + 0,144 + 0,070 + 0,155 + 0,142}{6} = 0,10$$

$$w_5 = \frac{0,068 + 0,035 + 0,024 + 0,023 + 0,051 + 0,142}{6} = 0,06$$

$$w_6 = \frac{0,068 + 0,035 + 0,036 + 0,023 + 0,017 + 0,470}{6} = 0,04$$

### Preverjanje doslednosti:

Najprej izračunamo  $Aw^T$ :

$$Aw^T = \begin{bmatrix} 1 & 7 & 7 & 9 & 9 & 9 \\ 1/7 & 1 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 1/7 & 1/3 & 1 & 1/2 & 3 & 2 \\ 1/9 & 1/3 & 2 & 1 & 3 & 3 \\ 1/9 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1 & 3 \\ 1/9 & 1/3 & 1/2 & 1/3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,57 \\ 0,15 \\ 0,08 \\ 0,10 \\ 0,06 \\ 0,04 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4,155 \\ 1,072 \\ 0,495 \\ 0,665 \\ 0,347 \\ 0,246 \end{bmatrix}$$

Sledi izračun:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{i - ti \text{ vnos v } Aw^T}{i - ti \text{ vnos v } w^T} = \left( \frac{1}{6} \right) \left[ \frac{4,155}{0,57} + \frac{1,072}{0,15} + \frac{0,495}{0,08} + \frac{0,665}{0,10} + \frac{0,347}{0,06} + \frac{0,246}{0,04} \right] = 6,567$$

To vrednost sedaj vnesemo v enačbo za izračun indeksa doslednosti:

$$CI = \frac{6,567 - n}{n - 1} = \frac{6,567 - 6}{6 - 1} = 0,113$$

Indeks doslednosti primerjamo z naključnostnim indeksom iz tabele:

Tabela 7.1: Indeks naključnosti

Število kriterijev n	Indeks naključnosti RI
2	0
3	0,58
4	0,90
5	1,12
6	1,24
7	1,32
8	1,41
9	1,45
10	1,51

Vir: Winston (2004)

$$CI/RI = \frac{0,113}{1,24} = 0,091$$

Ker je ta vrednost manjša od 0,1, zadostimo pogojem doslednosti in približek ocen uteži lahko uporabimo kot vrednost uteži.

## Priloga 8: Opis nekaterih uporabljenih funkcij

### DELAY

Funkcija DELAY omogoča modeliranje časovnih zamikov. Uporablja se v primerih, ko učinkuje spremenljivka A na spremenljivko B šele po določenem časovnem zamiku. Torej je vrednost spremenljivke B odvisna od vrednosti spremenljivke A v nekem preteklem času. V programskem jeziku ločimo materialne in informacijske časovne zamike. Ločimo zamike prvega reda, zamike višjih redov in pa zamik po načelu cevovoda. V časovnih zamikih prvega reda je verjetnost zamika opisana z enačbo, ki določa eksponentno porazdelitev:

$$p(t) = 1/D * \exp(-t/D) \quad (8.1)$$

V časovnih zamikih višjih redov pa je verjetnost zamika opisana z enačbo, ki določa Erlangovo razporeditev:

$$p(t) = \frac{(n/D)^n}{(n-1)!} t^{n-1} * \exp[-(n/D)t]; t > 0 \quad (8.2)$$

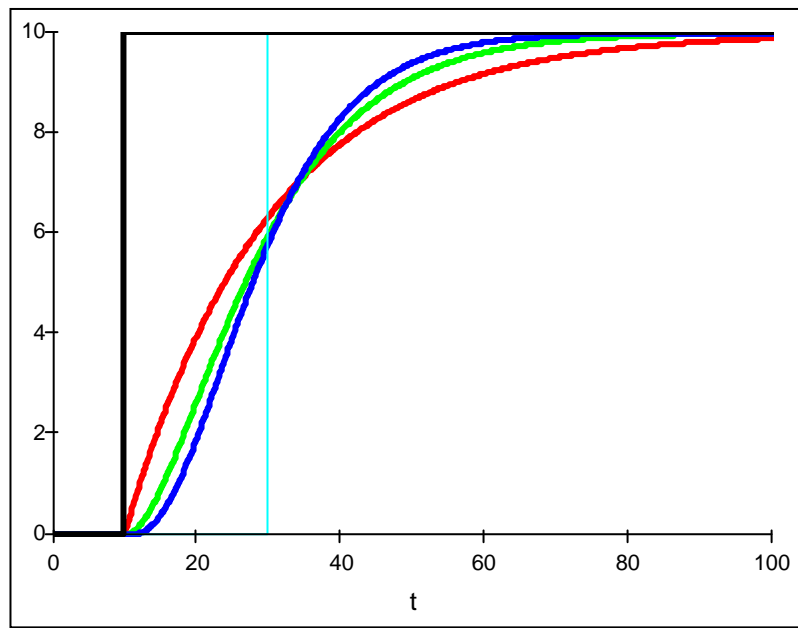
Kjer je:

D - povprečen čas zamika,

n - red zamika.

Program uporablja eksponentno porazdelitev. Slika 8.1 prikazuje nekatere zamike kot odgovor na funkcijo stopnice.

Slika 8.1: Vpliv zamika kot odgovor na stopničasto funkcijo



vir: Powersim Constructor Help

Na sliki 8.1 so:

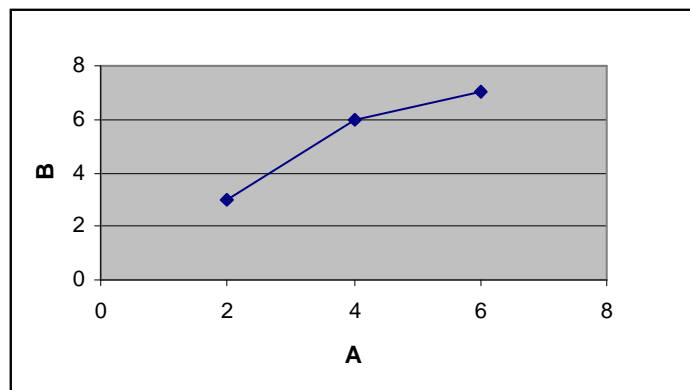
- vhodna vrednost (INPUT) izražena s stopničasto funkcijo,
- izhodna vrednost (OUTPUT) kot zamik prvega reda,
- izhodna vrednost (OUTPUT) kot zamik drugega reda,
- izhodna vrednost (OUTPUT) kot zamik tretjega reda,
- - - izhodna vrednost (OUTPUT) kot zamik po načelu cevovoda.

## GRAPH

Ta funkcija je koristna, ko ne poznamo natančne matematične formule vpliva spremenljivke A na spremenljivko B, ali pa v primeru, ko želimo uporabiti statistične ali izkustvene podatke o razmerjih med dvema spremenljivkama.

Npr. podatke v tabeli in grafikonu :

A	2	4	6
B	3	6	7



Izrazimo:

$B = \text{GRAPH}(A, 4, 2, (3, 6, 7))$ ,

kar pomeni, da je spremenljivka B odvisna od spremenljivke A, katere začetna vrednost je 4, korak pa 2. V oklepaju pa so vrednosti spremenljivke B ob vsakem koraku. Uporabljamo lahko oblike GRAPH, GRAPHCURVE, GRAPHLINAS in GRAPHSTEP, odvisno od načina, na katerega želimo, da so določene vrednosti med fiksnimi točkami in zunaj fiksnih točk.

## Priloga 9: Simulacijska metoda

Pri simulaciji se uporablja Eulerjeva metoda. Program najprej izračuna začetne vrednosti pretokov in nivojev, potem pa uporabi pretoke, da določi novo vrednost nivojem. Nova vrednost nivojev se uporabi za nov izračun vrednosti pretokov. Čas je določen s korakom simulacije (TIMESTEP).

### Algoritem

Določimo:

$N_t$  - vrednost nivoja  $N$  v času  $t$ ,

$P(N_t, t)$  - vrednost pretoka  $P$  v odvisnosti od nivoja  $N$  v času  $t$ .

Za izračun integrala na intervalu od  $t$  do  $t+\Delta t$  se uporabita naslednja dva koraka.

#### Korak 1:

Izračunaj pretok, ko je  $t=T$

Pretok =  $F(N_{T}, T)$

#### Korak 2:

Izračunaj vrednost nivoja v času  $t= T+\Delta t$  na osnovi vrednosti  $N_{T}$  in pretoka

$N_{T+\Delta t} = N_{T+\Delta t} * \text{Pretok}$

Pomembna lastnost programa je, da predpostavlja, da je pretok konstanta skozi interval  $\Delta t$ . To pomeni, da uporabi informacijo o pretoku le na začetku intervala. Z manjšanjem intervala  $\Delta t$ , se metoda bliža natančni rešitvi, hkrati pa se večja število potrebnih izračunov in napak zaradi zaokroževanja. Korak simulacije je odvisen od uskladitve med tema dvema kriterijema.