

Dijagrami uzročnih petlji

Jerbić, Lorena

Undergraduate thesis / Završni rad

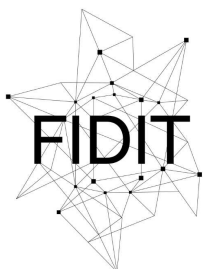
2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka / Sveučilište u Rijeci**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:195:626865>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-16**



Sveučilište u Rijeci
**Fakultet informatike
i digitalnih tehnologija**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Informatics and Digital Technologies - INFORI Repository](#)



Sveučilište u Rijeci – Odjel za informatiku

Preddiplomski jednopredmetni studij informatike

Lorena Jerbić

Dijagrami uzročnih petlji

Završni rad

Mentor: doc. dr. sc. Marija Brkić Bakarić

Rijeka, rujan 2019.

Rijeka, 18.06.19.

Zadatak za završni rad

Pristupnik: Lorena Jerbić

Naziv završnog rada: Dijagrami uzročnih petlji

Naziv završnog rada na eng. jeziku: Causal Loop Diagrams

Sadržaj zadatka: U radu će se najprije dati definicija sustava i prikaz karakteristika sustava. Poseban fokus stavit će se na kompleksne sustave. Potom će se uvesti termin povratnih petlji i analizirati njihovi pozitivni i negativni aspekti. Na temelju ilustrativnih primjera prikazat će se dijagrami uzročnih petlji i dati smjernice za crtanje takvih dijagrama te opisati njihov razvoj i ograničenja.

Mentor

doc. dr. sc. Marija Brkić Bakarić



Voditelj za završne radove

dr. sc. Miran Pobar



Zadatak preuzet:



(potpis pristupnika)

SADRŽAJ

SAŽETAK.....	4
SUMMARY	4
1. UVOD	5
2. SUSTAV	6
2.1 Stabilnost sustava	7
2.2 Karakteristike sustava.....	8
2.2.1 AKTIVAN SUSTAV	8
2.2.2 OGRANIČEN SUSTAV	9
2.2.3 LABAV SUSTAV	9
2.2.4 VRIJEME REAKCIJE	10
2.2.5 PREDVIĐANJE	10
2.2.6 INTUITIVNI SUSTAV	10
2.2.7 SKRIVENI SUSTAV	11
2.2.8 RANJIV SUSTAV	11
2.3 Promjena i rast sustava	11
3. SLOŽEN SUSTAV	13
3.1 Karakteristike složenog sustava.....	14
3.2 Problem složenosti.....	15
4. DIJAGRAMI UZROČNIH PETLJI.....	17
4.1 Pravila za crtanje dijagrama	19
4.1.1 Uzročnost nasuprot korelaciji	19
4.1.2 Označavanje polariteta veze	20
4.1.3 Određivanje polarnosti petlje	21
4.1.4 Imenovanje petlje	22
4.1.5 Imenovanje varijabla.....	23
4.1.6 Kašnjenje u vezama	24
4.1.7 Grafički dizajn dijagrama	25
4.1.8 Eksplicitni ciljevi	25
4.1.9 Stvarni i percipirani uvjeti	26
4.2 Primjer dijagrama	27
4.3 Struktura i ponašanje kroz vrijeme – povratne petlje i njezina dinamika	28
5. ZAKLJUČAK	31
6. POPIS SLIKA	32

7. LITERATURA..... 33

SAŽETAK

Sustav je neka cjelina koja se sastoji od manjih dijelova, a ti dijelovi su međusobno povezani. U ovom radu kroz mnoge primjere je prikazano kako izgledaju stabilni, a kako nestabilni sustavi. Navedene važne karakteristike sustava poput aktivnosti, ograničenosti, labavosti, vremena reakcije, predviđanja, intuitivnosti, skrivenosti i ranjivosti. Kroz nekoliko primjera prikazano je kako se sustav mijenja i razvija. Složeni sustav, njihove karakteristike i problemima na koje takav sustav nailazi prikazani su u posebnom poglavlju. U nastavku se govori o dijagramu uzročnih petlji koji predstavlja povratnu strukturu sustava, a sastoje se od varijabli koje su povezane strelicama. Polaritet uzročnih veza može biti pozitivan ili negativan. U radu su prikazana i određena pravila za crtanje dijagrama uzročnih petlji. Na primjeru je pojašnjen razvoj dijagrama uzročnih petlji, ali su i napisana njegova ograničenja. Rad završava prikazom strukture povratnih petlji i ponašanja kroz vrijeme, odnosno njihove dinamike.

Ključne riječi: Sustav, stabilnost, složeni sustav, dijagram uzročnih petlji, povratne petlje.

SUMMARY

A system consists of smaller parts which are interconnected. Through several examples, the behavior of both stable and unstable systems has been shown. Other important characteristics of the systems, such as activity, limitation, loose coupling, reaction time, anticipation, counter-intuitiveness, latency and vulnerability are listed. On a few examples it is shown how the system is changing and evolving. A complex system, their characteristics, and their problems are discussed in a separate chapter. In the subsequent chapters, a diagram of causal loops that represents the system's return structure and consists of variables that are connected by arrows is explained. The polarity of causal loops can be positive or negative. A set of rules for drawing causal loop diagrams are also listed in this work. The development of a diagram of causal loops, including its limitations, is illustrated on an example. The structure of the feedback loops and their behavior through time, i.e. their dynamics, is presented in the final part of the work.

Keywords: system, stability, complex system, diagram of causal loops, feedback loops.

1. UVOD

Stoljećima su znanstvenici vjerovali da je razdvajanje i otkrivanje od čega je nešto napravljeno najbolji način da saznamo više o nečemu što ne razumijemo. Redukcionizam je ideja da nešto nije ništa drugo do zbroja njezinih dijelova. Skupina istraživača 1920-ih počela je ozbiljno proučavati same obrasce i načine na koje su organizirane sve različite vrste sustava. Otkrili su da bez obzira koliko različiti sastojci različitih sustava izgledali, svi su bili sastavljeni prema istim općim pravilima organizacije. Opća teorija sustava je revolucionirala mnoga područja znanosti. Omogućila je razvoj sofisticiranih računala i automatizacije, a njezina praktična primjena kao „sustavna analiza“ bitan je alat za upravljanje svim vrstama poduzeća i institucija.

Prvi dio ovoga rada govori o sustavu, a samu riječ sustav koristimo u svakodnevnom smislu, kao u „živčanom sustavu“, „pravnom sustavu“ ili „rashladnom sustavu“ u automobilu. Sustav je skup dijelova koji međusobno djeluju u cjelini. Sustav hlađenja u automobilu, na primjer, može se sastojati od radijatora, ventilatora, vodene pumpe, termostata, rashladnog plašta, nekoliko crijeva i stezaljki. Oni zajedno djeluju kako bi spriječili pregrijavanje motora, ali odvojeno su beskorisni. Da bismo obavili posao, svi dijelovi moraju biti prisutni i moraju biti uređeni na odgovarajući način.

Drugi dio ovog rada odnosi se na dijagrame uzročnih petlji, a onisu vizualni alat za prikaz sustava s povratnim vezama. Takvi dijagrami pokazuju uzročno-posljedične veze i povratne procese. Svi dijagrami uzročnih petlji konstruirani su od istih osnovnih elemenata: riječi, fraza, veza i petlji s posebnim konvencijama za imenovanje varijabli i za prikazivanje polariteta veza i petlji. Zamislimo da imamo jednu petlju koja povezuje glad i količinu hrane u sićušnom modelu apetita. Ako smo gladni, mi ćemo jesti. Zdrav razum i iskustvo govore da postoji veza između gladi i količine koja se konzumira, a ta veza je prikazana kroz dvije uzročne veze. U prvoj vezi glad utječe na količinu hrane, dok u drugoj vezi količina hrane koju jedemo ima suprotan utjecaj na glad. Svaka veza ima svoj polaritet koji može biti pozitivan ili negativan. Pozitivna veza znači da ako se uzrok povećava, tada se i učinak povećava. Povećanje gladi uzrokuje povećanje količine hrane. Negativna veza znači da ako se uzrok povećava, tada se učinak smanjuje. Tako povećanje količine hrane uzrokuje smanjenje gladi. U svakom slučaju, glad i količina hrane koja se konzumira su međusobno ovisni.

2. SUSTAV

Sustav je neka uređena cjelina koja se sastoji od elemenata koji su u međusobnom odnosu. Bitno je razlikovati dva različita pojma, a to su sustav i gomila. Ako je nešto sastavljeno od više dijelova i nije važno kako su ti dijelovi raspoređeni, onda se radi o gomili, a ne o sustavu. Postoji još jedna razlika između pojmova sustava i gomile, a to je da se gomili može dodati ili oduzeti količina, ali njezin sastav u principu ostaje nepromjenjiv. Dodavanje više mlijeka u posudu povećava njezinu količinu, ali dodajući još jednu kravu onoj koju već imamo ne daje nam veću kravu. Prolijevanje pola mlijeka u drugu posudu daje vam dvije manje količine mlijeka, ali dijeljenje krave na pola ne daje vam dvije manje krave. Krava je živi sustav koji pretvara travu u mlijeko. Sustav funkcionira tako da njegovo ponašanje ovisi o njegovoj cijeloj strukturi, a ne samo o zbrajanju ponašanja njegovih različitih dijelova. Neki sustav može biti dio većeg sustava, a tada je on podsustav tog sustava. Taj veći sustav također može biti podsustav još većeg sustava. Na primjer pogledajmo lanac manjih i većih sustava kojima krava pripada. Krava je vrlo složen sustav, ali je također dio velikog broja većih sustava. Krava je zapravo podsustav visoko organiziranog društvenog sustava koji se naziva stado. Svako stado ima vođu i lanac zapovijedanja koji je jasno definiran i strogo se provodi. S druge strane možemo promatrati kravu kao sustav i uočiti njezine podsustave, a to su cirkulacijski, živčani, reproduktivni i probavni sustav. Ti sustavi rade zajedno kako bi omogućili kravi da ostane živa i radi razne stvari koje krava radi. Kada bismo nastavili ovaj proces promatranja sve manjih podsustava došli bismo do razine atomskih čestica.

2.1 Stabilnost sustava

Skup manjih jedinica nekog sustava je stabilniji od jedne velike jedinice. Možemo vidjeti na primjeru protona i neutrona. Oni su najveće čestice koje postoje u prirodi. Fizičari su eksperimentalno napravili veće čestice, ali su tako nestabilne da mnoge od njih traju manje od milijardu sati sekunde prije nego što se raspadnu. Isto tako atomi koji su veći od određene veličine postaju sve nestabilniji. Skupina od pet ljudi može raditi zajedno kao jedan tim, ali grupa od pet tisuća ljudi to ne može jer bi bilo gotovo nemoguće funkcionirati bez podjele na manje radne skupine i organiziranje nekog načina komuniciranja između tih skupina. Skupina koja je velika je samo neorganizirana gomila ako se ne stvori jedna ili više viših razina organizacije sustava. U prethodnom poglavlju je objašnjeno da sustav nije isto što i gomila.

Postoji dobar razlog zašto bi viša razina organizacije sustava trebala biti stabilnija i on dovodi natrag do izvorne definiciju onoga što je sustav. Rečeno je da je sustav skup stvari koje međusobno djeluju kao jedna cjelina. Ključna riječ ovdje je interakcija. Ako jedan dio utječe na ostatak sustava, a sustav u cjelini ima učinak na jedan dio, tada je stvoren kružni odnos odnosno petlja. To je najbolje razumijeti na temelju primjera. Kada osoba vozi bicikl to je zapravo dvodijelni sustav. Osoba bez bicikla ne može voziti bicikl, a bicikl se bez osobe ne može voziti. Ono što osoba radi utječe na ono što bicikl radi i ponašanje bicikla ima informacije o postupcima osobe. Dakle, bicikl i osoba međusobno ovise jedan o drugom. S obzirom da je ovdje fokus na stabilnosti, na primjeru bicikla možemo primjetiti da ukoliko se osoba popne na bicikl i ne radi ništa, tada bicikl i osoba postaju nestabilni. Također dolazi do nestabilnosti ako osoba učini neku pogrešnu stvar koja dovodi do pada nje i bicikla. Da bi osoba pravilno vozila bicikl, potrebne su joj informacije o tome gdje je bicikl i na koji način se naginje. Bez stalnog protoka informacija koje osoba dobiva od njezinih očiju, mišića i balansa cijevi u ušima bilo bi teško, a možda i nemoguće voziti bicikl. "Ulaz" je informacija koju osoba ima, zbog čega se odlučila koristiti svoje mišiće, a "izlaz" sustava je kretanje bicikla i nje same. Nakon pokretanja bicikla odnosno sustava pojavljuje se novi položaj za bicikl koji pruža nove informacije s kojima mozak radi. Informacije o izlazu sustava vraćaju se na ulaznu stranu sustava. Mozak prima informacije o tome gdje se nalazi bicikl i to uspoređuje s mjestom gdje bi trebao biti bicikl. Ako postoji razlika između tih mjesta, mozak govori mišićima na način na koji je to osoba učinila pa će se onda zaobići izlaz, dovodeći tako sustav natrag na ulaz. Budući da ovakav sustav djeluje tako da poništi ili negira bilo kakve promjene u sustavu, to se naziva petlja "negativne povratne informacije". Svi stabilni sustavi dobivaju ovu sposobnost samo-stabiliziranja iz negativnih povratnih petlji. Negativne povratne petlje su u svakom dijelu naše prirodne i društvene okoline.

Povratne petlje pomažu u održavanju stabilnosti mnogih društvenih organizacija. Na primjer, mnogim vrstama društvenih skupina je potreban minimalan broj članova kako bi pravilno funkcionirale. Crkvi je potrebna dovoljno velika zajednica da plati plaću ministara i održavanje crkvene imovine. Košarkaški tim treba dovoljno igrača da bi imao igrače koji će igrati te one koji će sjediti na klupi kao zamjena za one koji su se povrijedili ili ako budu

izbačeni. Ukoliko odustane veći broj ljudi od neke grupe, a nema novih članova koji bi ih zamijenili, onda nastaje problem. Košarkaši trebaju reklamirati svoj klub, izlaziti van i preporučiti ga ljudima, organizirati upisivanje novih članova, promijeniti nešto kako bi ljudima klub postao interesantniji i privlačniji. Trebaju saznati zašto su stari članovi kluba otišli jer time će bolje odlučiti što promijeniti kako bi se znali poboljšati. Ako budu uspješni u nalaženju rješenja za poboljšanje, članstvo u grupi ponovno će se povećavati sve dok ne bude iznad minimalne razine. Rezultat je negativan povratni proces koji zadržava broj novih članova koji se pridružuju grupi, a taj je broj približno jednak broju starih članova koji napuštaju grupu.

Slijedi pojašnjenje kako funkcioniraju sustavi koji nemaju fiksni cilj. Sustav grijanja, primjerice, ima za cilj održati bilo koju temperaturu postavljenu na termostatu, a društvena grupa ima za cilj održavanje razine članstva koja je dovoljna za pojedine aktivnosti. Sustav dobiva povratnu informaciju o tome koliko je daleko od cilja i koristi povratne informacije kako bi pokušao smanjiti razliku. Sustavu nije važno odakle dolazi razlika jer on samo osjeća razliku i pokušava je smanjiti. Na primjer, možemo uštedjeti energiju smanjujući kućni termostat za nekoliko stupnjeva noću i ponovno ga pojačati ujutro kad ustanemo. Negativna povratna veza u sustavu grijanja uzrokuje da se sustav prilagođava svakoj promjeni, odniže temperature tijekom noći sve do više temperature tijekom dana.

Ovdje su samo navedeni neki primjeri gdje negativne povratne informacije osiguravaju stabilnost u raznim vrstama sustava i u svim dijelovima našeg okoliša. Okruženi smo sustavima koji se mogu nositi s promjenama, koristeći negativne povratne informacije kako bi ga kontrolirali. Trenutno u našem tijelu da bi nas održali na životu postoji mnogo samostabilizirajućih sustava. Samo krv sadrži na stotine kemikalija - kisik, ugljični dioksid, vodu, soli, šećere, enzime, masti, minerale, i tako dalje. Svaki od sustava u tijelu je reguliran jednom ili više petlji.

2.2 Karakteristike sustava

Budući da su negativne povratne informacije toliko univerzalne, čini se da se različiti sustavi ponašaju na sličan način. Ovdje su navedene karakteristike sustava:

2.2.1 AKTIVAN SUSTAV

Karakteristika samostabilizirajućih sustava je da oni aktivno reagiraju na promjene. Oni ne mogu ignorirati promjene koje se događaju. Pogledajmo to na primjeru bicikla koji neće učiniti ništa da poveća svoju stabilnost ako dođe povjetarac. Zato se bicikl može prevrnuti ako jako zapuše. Ako vozimo bicikl u tim uvjetima, onda se možemo prilagoditi vjetru te tako

zaustaviti pad s bicikla. Ponekad sustav dobiva potrebnu energiju od istih vanjskih sila koje ga pokušavaju promijeniti, dok neki sustavi dobivaju energiju iz različitih izvora. Mnogi od njih mogu pohraniti određenu količinu energije neko vrijeme. Primjerice, živi sustavi crpe energiju od sunčeve svjetlosti ili hrane i pohranjuju energiju za kasniju uporabu. Gotovo svi živi sustavi nastavljaju djelovati i koristiti energiju čak i kada ne moraju reagirati na svoje okruženje. Neko sjemenje biljke može čekati mnogo godina da bi krenulo rasti. Oni moraju ostati aktivni jer u suprotnom umiru, odnosno ne mogu više funkcionirati. Postoji pravilo koje kaže da što je sustav složeniji, to više energije mora potrošiti samo da bi se održao i aktivnije će baviti pokretanjem promjena u okruženju.

2.2.2 OGRANIČEN SUSTAV

Postoje ograničenja vezana uz iznos i promjene s kojima se svaki sustav može nositi. Jedna vrsta sustava se nastavlja nositi s promjenama dugo vremena u periodu neuspjeha, ali tada rezerve sustava postanu iscrpljene. Primjerice u tijelu pohranjujemo energiju i postupno je koristimo tijekom određenog vremena. Ako smo na hladnom mjestu, naše će tijelo iskoristiti tu energiju kako bi održalo tijelo toplim.

Ako se tijelo dugo zadržava na vrućini, sve naše rezerve energije će se potrošiti i sustav kontrole temperature će jednostavno prestati raditi. Temperatura tijela ostat će stabilna čak i kada zrak postane iznimno vruć, ali samo neko vrijeme. Kada to ograničenje prođe, sustav kontrole temperature se zatvara čime se prestajemo znojiti, ali temperatura tijela raste. To nazivamo toplinskim udarom. Mnogi negativni sustavi s povratnim vezama su takvi. Vrlo su stabilni u širokom rasponu uvjeta, ali kada dođe do nagle promjene, odnosno kada se pomaknu izvan svojih granica, postaju nestabilni, stoga je važno znati koje su to granice.

2.2.3 LABAV SUSTAV

Još jedna karakteristika samostabilizirajućih sustava je da negativna povratna veza ne sprječava promjene, nego samo reagira na promjene i drži ih pod kontrolom. Rezultat su karakteristične oscilacije u ponašanju sustava. U nekim slučajevima oscilacije su tako male da ih je teško otkriti, ali uvijek su prisutne. U drugim slučajevima oscilacije su tako velike da daju tim sustavima labav ili čak neuredan izgled. Otporni sustavi su često jeftiniji i čvršći te se mogu bolje nositi s velikim promjenama u okolini nego precizniji sustavi. Primjerice, obični termostat može održavati temperaturu u kući od promjene više od 5 ili 6 stupnjeva, a košta oko 30 dolara, dok neki super-precizan sustav koji može održavati razlike u temperaturi izražene u desetini stupnja u posebnom laboratoriju košta puno više novaca.

U labavom sustavu postoje i negativne povratne petlje. Negativna povratna petlja ostavlja svoj potpis u obrascu promjene i odgovora iznova i iznova. Svaki put kada uočimo

ovu vrstu cik-cak ponašanja u sustavu, možemo biti gotovo sigurni da iza njega postoji negativna povratna petlja.

2.2.4 VRIJEME REAKCIJE

Svaka negativna povratna petlja također ima određena vremenska ograničenja koja utječu na njezino ponašanje. Jedno od tih vremenskih ograničenja je vrijeme reakcije, a to je minimalno vrijeme potrebno za jedan kompletan krug oko petlje. Pretpostavimo da nam netko stavi iglu u ruku. U ovom slučaju vrijeme reakcije bi bilo toliko dugo koliko je potrebno da se bol registrira, da signal reakcije stigne do mišića i da mišići maknu ruku od igle. Vrijeme reakcije za refleks boli je vrlo kratko. Postoje neke druge radnje za koje nam treba dulje vremena jer zahtijevaju svjesnu misao kao što je reagiranje na ulični znak. Vrijeme reakcije je važno jer ako je presporo promjena se može dogoditi tako brzo da je sustav oštećen prije nego što ima priliku reagirati.

2.2.5 PREDVIĐANJE

Ponekad si sustav ne može priuštiti kašnjenje koje uključuje čak i petlja povratnih informacija. Komarca, primjerice, možemo ignorirati sve dok ne osjetimo da počne gristi, ali zatim reagiramo na njega. U tako bezazlenom slučaju kašnjenje reakcije nije problem, ali kašnjenje reakcije jest problem u situaciji kada tigar jede čovjeka. Bilo bi bolje naći način da reagiramo prije nego što ugrize, ali ponekad i u takvim slučajevima nas neće spasiti niti najbrža reakcija. Sustavi se nose s ovakvim problemima reagirajući na događaje upozorenja koji se obično događaju prije nego se pojavi određeni problem. Jedino što možemo prije nego što nas tigar napadne je sakriti se ukoliko ga čujemo ili vidimo prije nego što je on nas. Ovo je još uvijek negativna povratna veza i naše vrijeme reakcije je još uvijek važno, ali petlja se temelji na signalu upozorenja, a ne na stvarnom problemu.

Jedan od razloga zbog kojeg mnogi sustavi imaju neodgovarajuće vrijeme reakcije je to što imaju negativne povratne petlje koje reagiraju na probleme, a ne na upozorenja tih problema. To posebno možemo vidjeti kod političkih sustava, osobito kada policijski sustav intervenira u ekonomskim i ekološkim sustavima.

2.2.6 INTUITIVNI SUSTAV

Negativne povratne informacije često stvaraju ponašanje koje se čini u suprotnosti s intuicijom, odnosno nije u skladu sa zdravim razumom. To se može vidjeti na primjeru poljoprivrednika koji pokušava ubiti štetočinu. Većina insekata ima predatore koji ih drže pod kontrolom, ali većina pesticida ubija predatore kao i štetočine. Pošto se štetočine obično

uzgajaju brže od grabežljivaca, to znači da će doći sljedeća generacija štetočina te da tamo neće biti predatora koji će ih kontrolirati. Dolazi do „eksplozije“ štetočina, a time farmer dobiva lošiji ishod nego na početku. Postoje neke druge situacije u kojima možemo doći do nekog rješenja, ali to rješenje ili ne radi ili šteti zbog načina na koji sustav pokušava poništiti smetnje. Primjerice, većina nas uzima zdravo za gotovo da ima dovoljno stanova koje bismo htjeli kupiti kako bismo imali neko utočište. Postoji problem ako se više ljudi istodobno odluči preseliti u isti grad. Odjednom dolazi do prevelike potražnje za mjestom za život, a time može doći do toga da nema nedovoljno kuća i stanova za sve ljude. Stanodavci će povećati rente i iznajmljivati sve svoje stanove. Tada ljudi počinju graditi nove kuće, a stare obnavljaju. Najam postaje visok, ali to dovodi do povećanja ponude što rješava osnovni nedostatak i pomaže da se ponovno smanje rente. Ako želimo promijeniti situaciju koju kontrolira negativna povratna petlja, onda je bolje pokušati promijeniti način na koji dijelovi djeluju. Ono što je zapravo prvi korak da bi se sve to uspjelo jest shvatiti što je sustav i kako radi.

2.2.7 SKRIVENI SUSTAV

Čak i ako razumijemo kako negativne povratne informacije djeluju, svejedno je teško pogoditi kako će sustav reagirati na promjenu jer su povratne petlje o kojima trebamo nešto znati rijetko vidljive. Primjerice, seljani u jednoj regiji Afrike imali su problema s nilskim konjima koji su dolazili iz rijeke kako bi pojeli vrtove seljana. Kada su ubili nilske konjedošlo je do problema jer su se mnogi seljani razboljeli. Nitko nije znao razlog zašto se to dogodilo, sve dok lokalni znanstvenik konačno nije otkrio vezu. Bolest je uzrokovao organizam koji živi u blatu uz rijeku. Dok su nilski konji bili živi, oni bi uzburkali blato i time ubili većinu jaja te zadržali organizam pod kontrolom. Kada su nestali, taj se organizam mogao slobodno razmnožavati što je dovelo do porasta bolesti.

2.2.8 RANJIV SUSTAV

Najtvrdokorniji sustavi negativnih povratnih informacija su također podložni stvarima koje su povezane s načinom na koji se informacije prenose u petlji povratne veze. Uzmimo za primjersituaciju u kojoj zapuhne povjeratac dok vozimo bicikl. Iako je vjetar slab, on može donijeti prašinu ili dim u oči. Mi možemo zatvoriti oči, a time će povjetarac smanjiti protok informacija do našeg mozga što dovodi do ometanja sustava. Ponekad se ova ranjivost može iskoristiti za dobru prednost kada želimo promijeniti način na koji sustav djeluje. Ako očigledna rješenja ne rade, često je vrijedno tražiti negativne povratne petlje koje uzrokuju nevolje i pokušati pronaći način za promjenu njihovog ponašanja.

2.3 Promjena i rast sustava

Negativne povratne petlje osiguravaju stabilnost sustava u našoj okolini. Ako se pokvari negativna povratna petlja, onda dolazi do promjene (npr. kada osoba dobije toplinski udar ili kada društveni sustav postane nestabilan i propadne). Neke promjene proizlaze iz samih povratnih petlji jer se pokušavaju prilagoditi promjenama u drugim dijelovima okoline. Velika promjena koja se događa oko nas dolazi od sasvim drugačijeg procesa povratnih informacija, nazvanih pozitivnom povratnom petljom. Povratne informacije nastaju kada promjena u jednom dijelu sustava proizvede promjene u cijelom sustavu koje se zatim vraćaju kroz sustav i ponovno utječu na izvor promjene. Nova promjena uzrokovat će još više promjena, dok nešto ne prekine ciklus. To se naziva pozitivna povratna veza jer pojačava ili dodaje bilo kakve smetnje u sustavu.

Jednostanični organizmi, poput bakterija, mogu se podijeliti svakih pola sata. Akokrenete s jednom stanicom, ona se dijeli u dvije zasebne stanice. Nakon pola sata svaka se od tih stanica dijeli pa imamo četiri stanice. Nakon još pola sata ponovno se dijele kako bi se stvorilo osam stanica, a potom 16, 32, 64, 128 i tako dalje udvostručujući broj svakih pola sata. Imali bismo više od milijun stanica nakon samo 10 sati, a za samo jedan dan bilo bi više od 280 trilijuna bakterija, a sve proizvedeno iz iste izvorne stanice. Sva živa bića koriste ovaj sustav za rast. Poput gotovo svih životinja, počeli smo kao jedna oplodena stanica koja se dijeli na dva dijela. Potom se ponovno oba dijeladijele i nastavlja se dijeliti. Stanice se drže zajedno u grupi. Uskoro počnu prihvaćati različite uloge. Neke od njih postaju stanice kože, mišićne stanice, a neke živčane stanice. Svaka stanica također je unaprijed programirana da se prestane dijeliti kada dosegne određeno stanje. Inače bi nastavila rasti sve brže i brže dok nas ne bi ubila.

Jedna od pozitivnih petlji koja je imala veliki utjecaj na ljudsku vrstu je ona koja kontrolira rast znanja. U prapovijesno vrijeme pojedinac je naučio neke stvari o svojoj okolini izravnim iskustvom i naučio druge stvari od drugih članova svoga plemena. U svom životu naučio je nekoliko novih stvari koje je vrijedno prenijeti na druge, npr. kako oblikovati sjekiru. No tada nije mogao precizno mjeriti i nije imao vremena proučavati stvari koje nisu utjecale na njegov opstanak, a nažalost nije bilo moguće niti zabilježiti ono što je naučio. Kada je umro, većina onoga što je naučio umrlo je s njim. Razvoj tehnika za precizno mjerenje i izračunavanje, posebno razvoj aritmetike i geometrije, je ubrzao proces povećanja znanja. Povećano znanje je također omogućilo ljudima da učinkovitije proizvode hranu i bogatstvo. Što više znanja imamo, to je bolje naše društvo. Iako ne možemo dotaknuti znanje ili ga vidjeti, ono može i dalje rasti pozitivnim povratnim informacijama na isti način na koji tvrtke rastu. Jedino ograničenje za pozitivne povratne informacije je da smo na kraju došli do točke gdje su sve potrebne informacije prisutne.

Postoje još neke važne pozitivne povratne petlje, a jedna od njih je moć koja je ljudima stvarala probleme još prije početka civilizacije. Petlja s rastom moći ovako funkcionira: kad pojedinac dobije moć u društvu kroz bogatstvo, nasilje, politiku ili bilo koji drugi način, on

ima sposobnost da naudi ili pomogne drugim ljudima. Oni drugi ljudi prirodno žele ugoditi osobi koja ima moć kako bi mogli izbjeći štetu i eventualno dijeliti nagrade. Rezultat toga je da će osobi koja vlada ljudi željeti ugoditi, što mu daje još više moći. Ako se ništa ne učini kako bi se zaustavio taj proces, pojedinac će na kraju kontrolirati cijelo društvo.

Rast znanja, stanovništva, ekonomskog bogatstva i moći su velike sile za promjene u suvremenom životu. Rast znanja omogućava ljudima da im životu budu sigurniji, dulji i zdraviji. Rast bogatstva i rast znanja su zapravo međusobno ovisni jer su nova znanja pomogla ljudima da ulože svoj novac u rad.

3. SLOŽEN SUSTAV

Komplicirani sustavi su ponekad dijelovi prilično jednostavnih sustava. Komponente sustava u stvarnom svijetu zapravo su članovi tisuća većih sustava od kojih su neki od njih jednostavni, a neki nisu. Ovdje ćemo razmotriti neke karakteristike onoga što ćemo nazvati složenim sustavima te prikazati njihovo ponašanje koje se razlikuje od ponašanja jednostavnih sustava i neke od problema koje predstavljaju.

3.1 Karakteristike složenog sustava

Prva karakteristika složenih sustava je da su stabilni iako se suočavaju s velikim brojem promjena u okolišu. Složeni sustav treba sadržavati veliki broj negativnih povratnih petlji i one moraju biti u stanju dobiti i koristiti mnogo informacija o svojoj okolini. Najjednostavniji sustavi poput termostata s fiksnom postavkom temperature imaju samo jednu petlju i trebaju samo jednu informaciju da bi obavili svoj posao, ali mogu donijeti samo jednu vrstu promjene. Termostat ne može, recimo, učiniti nešto protiv provalnika ili razbijenih prozora. Složeni sustavi često sadrže čak i milijune jednostavnih povratnih petlji, tako da mogu zadržati ravnotežu unatoč mnogim različitim vrstama promjena koje se mogu dogoditi u stvarnom svijetu.

Druga karakteristika složenih sustava je da su svrhoviti odnosno imaju ciljeve i aktivno teže tim ciljevima. Primjerice ekologija želi koristiti svaki mogući izvor energije u fizičkom okruženju, a ljudska bića žele prijateljstvo i poštovanje. Neljudski sustavi često su toliko uporni u postizanju svojih ciljeva da se naizgled čini da imaju vlastite umove. Osim neljudskih sustava i ljudski sustavi mogu također imati svoje ciljeve.

Treća karakteristika složenih sustava je sposobnost praćenja programa ili niza koraka pomoću povratne informacije. Recepti za kuhanje pružaju jednostavan primjer: kuharica je rekla da se biskvit ispeče do smeđe boje. Kada je kolač postao smeđe boje, povratna petlja se zatvara dok kuhar isključuje pećnicu i prelazi na sljedeći korak. Složeniji tip ponašanja koje slijedi program je onaj koji uključuje grananje. Liječnik koji pregleda pacijenta može najprije pomisliti da pacijent ima groznicu. Ako postoji vrućica, traži bol u grlu. Ako je prisutno upaljeno grlo, mogao bi uzeti bris grla kako bi otkrio što uzrokuje infekciju. Ako nema groznice ili nema bolnog grla, on će pratiti neke druge smjerove istraživanja sve dok ne pronađe vjerojatni uzrok bolesti.

Četvrta karakteristika složenih sustava je samoprogramiranje. Sustavi stječu i sposobnost praćenja složenijih programa i sposobnost modificiranja tih programa kako ne bi ponavljali pogreške. Reprogramiranje jedan je od najosnovnijih oblika učenja kako bi se izbjeglo ponavljanje pogrešaka. Reprogramiranje znači izmišljanje novih i boljih načina za postizanje starog cilja i počinje zahtijevati stupanj uvida i kreativnosti. Nogometni trener koristi složenije vještine kada izmisli novu igru koja djeluje, nego kad jednostavno izbacuje igru koja ne uspije.

Peta karakteristika složenih sustava je sposobnost predviđanja promjena u okolišu. Predviđanje je ponekad povezano sa sustavom. Sustav može naučiti s iskustvom da jedan događaj obično prethodi nekom drugom te da počne reagirati na prvi događaj na način na koji reagira na drugi. Ako zvonite jednu minutu prije svakog hranjenja vašeg psa, pas će naučiti povezivati te dvije stvari. Predviđanje, kao i reprogramiranje, može biti rezultat uvida kao kad shvatimo kako će neki sustav djelovati u određenoj situaciji, iako nikada ranije nismo doživjeli tu kombinaciju. Primjerice političar gleda na predloženi novi zakon i pokušava pogoditi kakva će biti reakcija javnosti.

Šesta karakteristika složenih sustava je promjena okoline. Sustavimogu poboljšati učinkovitost s kojom komuniciraju s okolinom mijenjajući programe koje slijede i učeći predvidjeti promjene. Oni mogu modificirati okoliš kako bi se lakše nosili s njim. Svi sustavi imaju određeni utjecaj na njihovo okruženje, ali to je obično slučajni učinak, a često i štetan. Ako goveda i ovce pojedju travu na nekom području do korijena, onda pretvaraju travnjake u pustinju, čime se mijenja njihova okolina, ali na način koji nije dobar za stoku i ovce.

Sedma karakteristika složenih sustava je sposobnost sustava da se reproduciraju ili repliciraju. Najpoznatiji primjeri samoreplicirajućih sustava su živi organizmi koji kroz dijeljenje ili spajanje s drugim organizmom mogu proizvesti svoje kopije. Samoreplikacija se može pojaviti i među društvenim sustavima, primjerice kada društvo šalje pionire da osnuju novu zajednicu.

Osma karakteristika složenih sustava je tipična za biološke i društvene sustave, a to je samoodržavanje i popravak. Samoodržavanje zahtijeva veliku biblioteku informacija. Stanice u vašem tijelu stalno umiru i zamjenjuju ih nove stanice. Sustav se stalno mijenja na mikroskopskoj razini te održava sustav u cjelini.

Deveta karakteristika složenih sustava je reorganiziranje. Složeni sustavi su sposobni preuređivati svoj dio i mijenjati veze između tih dijelova kako bi zadovoljili nove uvjete ili postigli nove ciljeve. To je najlakše vidjeti u društvenim organizacijama kako se mijenja oblik vlasti.

Deseta karakteristika složenih sustava je samoprogramiranje. Često se čini da sustavi izmišljaju ciljeve, a ne da ih samo biraju prema nekom naslijeđenom programu. Politički sustav može tražiti slobodu nad sigurnošću ili pravdu nad kreativnošću. Ekonomski sustav može odabrati oportunitet preko reda ili predvidljivost u odnosu na zabavu. Nakon što je izumljen novi cilj, mora se razviti i novi program da bi ga se postiglo. Često se to napravi na temelju uvida, a rjeđe na temelju već postojećih programa. Sposobnost izmišljanja novih ciljeva i sposobnost osmišljavanja novih programa za postizanje tih ciljeva predstavljaju najvišu razinu fleksibilnosti u složenom sustavu.

3.2 Problem složenosti

U prethodnom poglavlju su navedene karakteristike složenih sustava, ali svaki sustav ne mora nužno imati sve te karakteristike pa dolazimo do problema ako ima jednu karakteristiku, a nedostaje mu druga koja prethodi. Složeniji sustav će vjerojatno imati većinu ili sve karakteristike. Povećanje složenosti stvara neke prednosti, ali i nedostatke. Ako je složen sustav kombiniran s jednostavnijim, onda će složen sustav normalno obrađivati više informacija, preciznije predvidjeti promjene u okolišu, brže učiti, djelovati fleksibilnije i općenito biti sposobniji odgovoriti na širi raspon promjenjivih okolnosti. Više složenosti također znači da sustav ima više podsustava za održavanje i koordinaciju i da ima više mjesta da stvari krenu krivo, a više energije i resursa treba potrošiti na prikupljanje i obradu informacija. Svako povećanje kompleksnosti košta, a beskorisne komplikacije samo smanjuju učinkovitost cijelog sustava. Većina složenosti u sustavima se isplati jer dodaje više stabilnosti i učinkovitosti nego što je oduzima.

Složeni sustavi sadrže mnogo podsustava i ti podsustavi mogu imati ciljeve koji se sukobljavaju ili su štetni za veći sustav. Za većinu složenih sustava najbolje pravilo je: učiniti svaku odluku na najnižoj mogućoj razini, ali biti spreman prebaciti kontrolu situacije na višu razinu ako se pojavi ozbiljan problem. Složeni sustavi ovise o informacijama za kontrolu ponašanja svojih podsustava, a to često daje poticaj podsustavima da iskrivljuju protok informacija. Primjerice dobre akademske ocjene i rezultati testa trebaju biti pokazatelji učenja i postignuća, ali su i osnova za upis u drugu školu i dobre poslove. Postoje i drugi načini da se dobiju dobre ocjene osim da radite i učite više pa će student biti u iskušenju da ide linijom manjeg otpora, kao što je učenje samo onoga što će biti na ispitu ili varanje na ispitu. Fleksibilnost koja omogućuje da kompleksni sustavi prežive u situacijama koje se brzo mijenjaju rezultira gubitkom predvidljivosti odnosno smanjuje dostupnost točnih informacija o tome što će sustav učiniti u budućnosti. Povećanje fleksibilnosti povećava ukupnu učinkovitost sustava toliko da je cijena neizvjesnosti ipak vrijedna plaćanja.

4. DIJAGRAMI UZROČNIH PETLJI

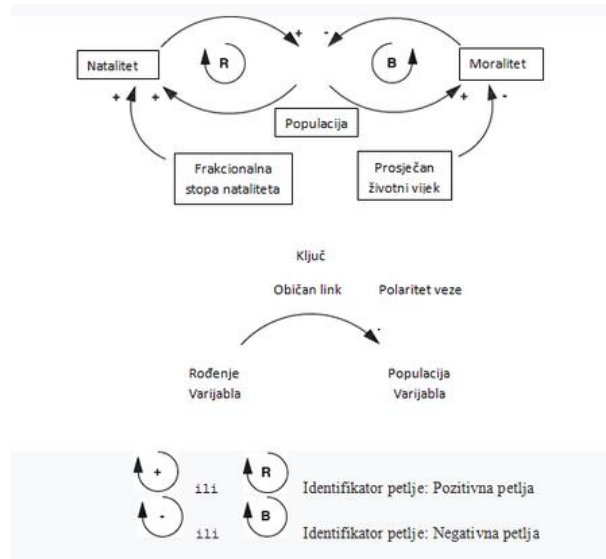
Povratna informacija je jedan od glavnih koncepata dinamike sustava. U dinamici sustava koristimo nekoliko alata među kojima je i dijagram uzročnih petlji. Dijagrami uzročnih petlji su važan alat za predstavljanje povratne strukture sustava, a oni su već dugo korišteni u akademskom radu i danas su sve češći u poslovanju. Dijagrami uzročnih petlji prilagođeni su tako da dobro prikazuju međuovisnosti i procese povratnih veza, a upotrebljavaju se na početku projekta modeliranja kako bi se obuhvatili mentalni modeli korisnika i modelara te se rabe u priopćavanju rezultata završenog procesa modeliranja. Neke od prednosti ovih dijagrama su što omogućavaju brzo hvatanje hipoteza o uzrocima dinamike, upoznavanje i hvatanje mentalnih modela pojedinaca ili timova i komuniciranje važnih povratnih informacija za koje vjerujemo da su odgovorne za problem. Postoje pravila koja treba slijediti po kojima se crtaju dijagrami uzročnih petlji. Dijagrami uzročnih petlji sastoje se od varijabli koje su povezane strelicama, a one označavaju uzročne utjecaje među varijablama. U dijagramu se također nalaze i identificirane važne povratne petlje.

Na primjeru na slici 1 možemo vidjeti da stopa nataliteta ovisi o frakcionalnoj stopi nataliteta te o broju stanovnika. Svakoj uzročnoj vezi dodijeljen je polaritet koji može biti pozitivan (+) ili negativan (-) kako bi se naznačilo kako se mijenja zavisna varijabla kada se neovisna varijabla promijeni. Važne petlje su označene s identifikatorom petlje koji pokazuje je li petlja pozitivna (pojačavajuća) ili negativna (balansirajuća) povratna sprega. Identifikator petlje kruži u istom smjeru kao i petlja kojoj odgovara. U primjeru možemo vidjeti da pozitivna povratna veza koja se odnosi na rođenja i populaciju ide u smjeru kazaljke na satu i tako i njen identifikator petlje, dok negativna petlja smrtnosti ide u smjeru suprotnom od smjera kazaljke na satu, kao i njen identifikator.

Pozitivna veza znači da prilikom povećanja uzroka učinak se povećava iznad onoga što bi inače bio, a prilikom smanjivanja uzroka učinak se smanjuje ispod onoga što bi inače bio. U primjeru na slici 1 možemo vidjeti da povećanje frakcionalne stope nataliteta znači da će se stopa nataliteta (godišnje) povećati iznad onoga što bi bila, a smanjenje frakcionalne stope nataliteta znači da će stopa nataliteta pasti ispod onoga što bi inače bila (npr. ako se prosječna plodnost poveća onda će stopa nataliteta s obzirom na stanovništvo rasti, a ako plodnost padne time će broj poroda pasti). Negativna veza znači da prilikom povećanja uzroka učinak se smanjuje ispod onoga što bi inače bio, a ako prilikom smanjivanja uzroka učinak se povećava iznad onoga što bi inače bio.

U primjeru možemo vidjeti da povećanje prosječnog životnog vijeka populacije znači da će smrtnost (godišnje) pasti ispod onoga što bi bila, a smanjenje prosječnog životnog vijeka znači da će smrtnost porasti iznad onoga što bi inače bila. Ako se očekivano trajanje života poveća, onda će se smanjiti broj umrlih, a ako se očekivano trajanje života smanji tada će smrtnost porasti. Polariteti veza opisuju strukturu sustava, a ne opisuju ponašanje varijabli i ono što se zapravo događa. Frakcionalna stopa nataliteta može se povećati, a može se i

smanjiti. Uzročni dijagram ne govori što će se dogoditi već govori što bi se dogodilo ako bi se varijabla promijenila.



Slika 1. Primjer i ključ za zapis dijagrama uzročnih petlji (prilagođeno iz (Sterman, 2000))

Povećanje varijabilnog uzroka ne znači nužno da će se učinak zapravo povećati. Postoje dva razloga. Prvo je to da varijabla ima više od jednog ulaza. Da bismo utvrdili što se zapravo događa, moramo znati kako se mijenjaju svi ulazi. U prijašnjem primjeru populacije, stopa nataliteta ovisi o frakcijskoj stopi nataliteta i veličini populacije. Ne možemo znati hoće li povećanje djelomične stope nataliteta zapravo dovesti do porasta nataliteta jer također moramo znati je li stanovništvo u porastu ili padu. Dovoljno velik pad populacije može uzrokovati pad nataliteta čak i prilikom povećanja frakcionalne stope nataliteta. Prilikom procjene polariteta pojedinih veza pretpostavljamo da su sve ostale varijable konstantne, a prilikom procjene stvarnog ponašanja sustava sve varijable međusobno djeluju istovremeno. Računalna simulacija je obično potrebna da bi se pratilo ponašanje sustava i utvrdilo koje su petlje dominantne. Drugi razlog je to da dijagrami uzročnih petlji ne razlikuju stanja i tokove - akumulacije resursa u sustavu i stope promjene koje mijenjaju te resurse. U primjeru populacije vidimo da je populacija stanje. Ona akumulira broj rođenih umanjenu za stopu smrtnosti. Povećanjem nataliteta će se povećati broj stanovnika, ali smanjenjem nataliteta se neće smanjiti populacija. Rođenja jedino mogu povećati populaciju odnosno ne mogu je smanjiti. Pozitivna veza između rođenja i stanovništva znači da se stopa nataliteta povećava ukoliko se povećava i stanovništvo (broj stanovnika). Povećanje stope nataliteta povećava populaciju iznad onoga što bi inače bilo, a smanjenje nataliteta smanjuje broj stanovnika ispod onoga što bi inače bilo.

Negativni polaritet veze od stope smrtnosti prema stanovništvu pokazuje da se oduzima od stanovništva. Pad stope smrtnosti ne povećava broj stanovnika. Pad broja smrtnih slučajeva znači da manje ljudi umire, a više ih ostaje živo. Stanovništvo će se smanjivati čak i ako se stopa nataliteta povećava ukoliko stopa smrtnosti bude veća od rođenja. Da bismo znali povećavaju li se ili smanjuju zalihe, moramo znati njezinu neto stopu promjene.

Uzročni dijagrami nikada ne mogu sve obuhvaćati. Oni također nikada nisu konačni, ali su uvijek uzročni. Planovi se razvijaju kako se vaše razumijevanje poboljšava i kako se razvija svrha modeliranja. Navedeni opis upravljanja radnim opterećenjem daleko je od savršenog. Evo nekoliko pitanja koja treba razmotriti: Prvo, dijagram ne prepoznaje razliku između stanja i tokova. Bilo bi korisno prikazati strukturu stanja i toka zaostalih zadataka. Drugo, neke se petlje mogu detaljnije specificirati.

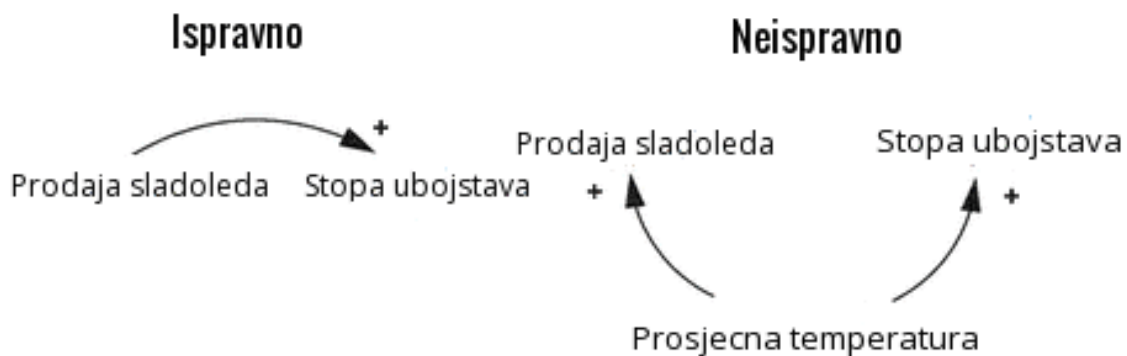
4.1 Pravila za crtanje dijagrama

4.1.1 Uzročnost nasuprot korelaciji

Svaka veza u dijagramu mora predstavljati uzročne odnose između varijabli. Model dinamike sustava mora dovoljno oponašati strukturu stvarnog sustava kako bi se model mogao ponašati na isti način kao i stvarni sustav. Ponašanje uključuje ne samo repliciranje povijesnog iskustva, nego i reagiranje na okolnosti i politike koje su potpuno nove. Korelacije među varijablama odražavaju prošlo ponašanje sustava, ali ne predstavljaju strukturu sustava. Pouzdane korelacije među varijablama mogu se raspasti ako se okolnosti promijene, ako ranije uspavane povratne petlje postanu dominantne te ako se isprobaju nove politike. Modeli i uzročni dijagrami moraju uključivati samo one odnose za koje vjerujemo da mogu stvoriti uzročnu strukturu sustava.

Iako je prodaja sladoleda pozitivno povezana sa stopom ubojstava, vjerojatno ne postoji veza između prodaje sladoleda i ubojstava. Na slici 2 možemo vidjeti da prodaja sladoleda i broj ubojstava rastu ljeti, a padaju zimi, kako prosječna temperatura varira. Zbunjujuća korelacija s uzročnošću može dovesti do užasnih pogrešnih procjena i pogrešaka u politici. Model na lijevoj strani slike pokazuje da bi smanjenje potrošnje sladoleda smanjilo stopu ubojstava, spasilo živote i omogućilo društvu da smanji proračun za policiju i zatvore. Veliki broj znanstvenih istraživanja traži prave uzroke, a neki od tih primjera su pitanja: Da li vitamin C izlječuje obične hladnoće? Može li konzumiranje zobnih mekinja smanjiti kolesterol i rizik od srčanog udara? Je li gospodarski rast doveo do niže stope nataliteta ili se niža stopa može pripisati pismenosti, obrazovanju za žene i povećanju troškova odgoja djece? Znanstvenici su naučili da je pouzdane odgovore na takva pitanja teško dobiti i zahtijevati predanost znanstvenoj metodi unatoč tome što se bave eksperimentima, ispitivanjima,

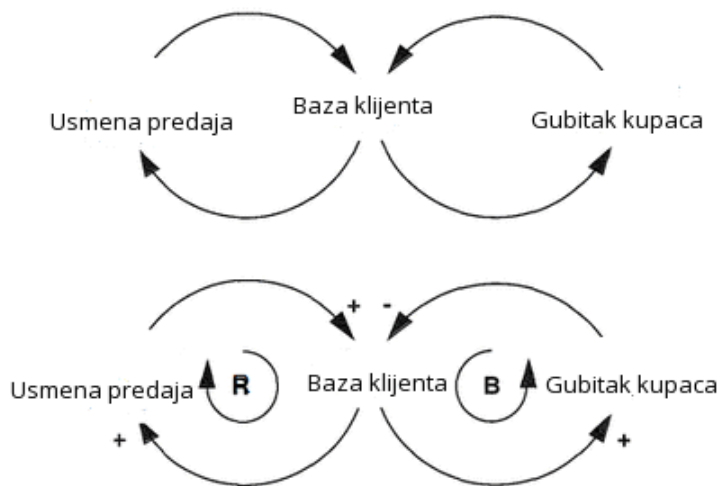
uzimanju velike količine uzorka, dugoročnim praćenjem i statističkim zaključcima (npr. zobene mekinje mogu nekim ljudima smanjiti kolesterol, ali na neke ljude one neće imati takav učinak). U društvenim i ljudskim sustavima koje često modeliramo, takvi eksperimenti su teški, često nemogući ili rijetki. Modeleri moraju posebno paziti da razmotre jesu li odnosi u njihovim modelima uzročni bez obzira na to koliko su jaki korelacijski ili koliko je velika statistička značajnost koeficijenata u regresiji.



Slika 2. Dijagrami moraju uključivati samo istinske uzročne veze (prilagođeno iz (Sterman, 2000))

4.1.2 Označavanje polariteta veze

Označavanje polariteta svake veze u dijagramima je obavezno. Pozitivne povratne petlje nazivaju se i pojačavajućim petljama i označene su sa + ili R, dok se negativne petlje ponekad nazivaju balansirajuće petlje i označene su sa - ili B što možemo vidjeti na slici 3.



Slika 3. Oznake veze i polariteti petlje (prilagođeno iz (Sterman, 2000))

4.1.3 Određivanje polarnosti petlje

Postoje dvije metode za određivanje je li petlja pozitivna ili negativna, jedan je brzi, a drugi spori način. Brzi način da odredimo je li petlja pozitivna ili negativna je brojanjem negativnih veza u petlji. Ukoliko je broj negativnih veza paran, onda je petlja pozitivna. Ukoliko je broj neparan, onda je petlja negativna. Pozitivne petlje jačaju promjenu, dok se negativne petlje protive smetnjama. Zamislimo da imamo mali poremećaj u jednoj od varijabli. Ako se smetnja širi oko petlje kako bi pojačala izvornu promjenu, tada je petlja pozitivna, a ako se suprotstavlja izvornoj promjeni, onda je petlja negativna. Kako bi se suprotstavio smetnji, signal mora doživjeti obrnuti neto znak dok putuje oko petlje. Neto preokret može nastati samo ako je broj negativnih veza neparan. Ponekad brza metoda ne valja jer se u složenom dijagramu može desiti da se pogrešno izračuna broj negativnih veza u petlji. Lako je pogrešno označiti polaritet veza pri prvom crtanju dijagrama, a malo je vjerojatno da će brojanje negativnih znakova otkriti ove pogreške. Dodjeljivanje polariteta petlji na ispravan način, a ne na brzi način, dugoročno štedi vrijeme.

Pravi način da se odredi polaritet petlje je praćenje učinka male promjene jedne od varijabli dok se ona širi oko petlje. Ukoliko povratni učinak pojačava izvornu promjenu, onda se tu radi o pozitivnoj petlji, a u suprotnom, ako se protivi izvornoj promjeni, onda je to negativna petlja. Na slici 3 se pretpostavlja porast prodaje od usmene predaje. Budući da je veza pozitivna, baza klijenata se povećava i signal se širi oko petlje kako bi se prodaja prodala od usmenog usta dalje. Ako se gubici kupaca povećaju, baza klijenata ne uspije. Što je niža baza kupaca, onda ima manje korisnika koji mogu odustati. Ova metoda radi bez obzira na to koliko je varijabla u petlji i bez obzira s kojom varijablom počinjete.

4.1.4 Imenovanje petlje

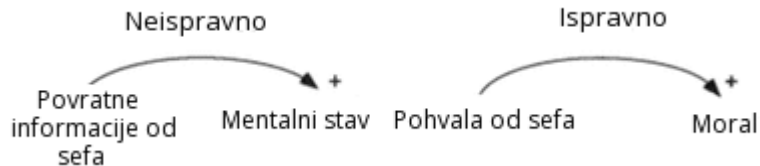
Kako bi pomogli svojoj publici da upravlja mrežom petlji, korisno je svakoj važnoj povratnoj informaciji dati broj i ime da bi se mogli lakše snalaziti. Numeriranje petlji kao što su na slici 4 R1, R2, B1 i B2 pomaže publici da pronađe svaku petlju dok se o njoj raspravlja. Imenovanje petlji pomaže u razumijevanju funkcije svake petlje i pruža korisne kratice za raspravu.

Na slici 4 prikazan je dijagram koji su razvili inženjeri i menadžeri u radionici osmišljenoj da istraži uzroke kašnjenja u isporuci za njihove organizacije. Ovaj dijagram predstavlja ponašanje inženjera koji pokušavaju dovršiti projekt u odnosu na rok. Inženjeri uspoređuju preostali posao s vremenom koje im je ostalo do isteka roka. Ako je ostalo više posla, nego vremena onda su inženjeri pod pritiskom zbog rasporeda jer bi trebali raditi prekovremeno. Međutim, ako radni tjedan bude predug time dolazi do zamora i smanjenja produktivnosti. Kako se produktivnost smanjuje, stopa završetka zadatka opada, a time se povećava pritisak u rasporedu i dovodi do još dužih sati. Pojačavajuća R1 petlja ograničava učinkovitost prekovremenog rada. Postoji još jedan način za brže dovršavanje posla, a to je smanjenje vremena provedenog na svakom zadatku. Trošenje manje vremena za svaki zadatak povećava broj izvršenih zadataka po satu i ublažava pritisak u rasporedu čime se zatvara petlja B2.

Cjelokupni model sadrži mnogo više petlji. Imena koja je grupa inženjera dala petljama morala je priopćiti menadžerima svoje stavove i razloge za njihovo ponašanje na jasan i uvjerljiv način. Razgovor se nije pretvorio u „ad hominem“¹ argumente između menadžera i inženjera. Sudionici su govorili o tome kako se pali R1 petlja i nelinearni odnosi između pritiska u rasporedu, prekovremenog rada, umora i pogrešaka. Nazivi za petlje olakšali su upućivanje na složene dijelove strukture povratnih informacija.

¹**Ad hominem** je pokušaj negiranja istinitosti neke tvrdnje. Osoba koja iznosi tvrdnju ukazujuća negativne karakteristike ili vjerovanja.

odrediti smislene veze. Na lijevoj strani slike 6 nijedna varijabla nema jasan smjer, dok značenje desne strane je jasno. Više pohvala od šefa povećava moral, a manje pohvala smanjuje moral. Imena treba odabrati tako da je njihov normalan osjećaj za smjer pozitivan. Izbjegavajte upotrebu naziva varijabli koje sadrže prefiks koji označava negaciju.



Slika 6. Ime varijable mora imati značenje povećanja ili smanjenja (prilagođeno iz (Sterman, 2000))

4.1.6 Kašnjenje u vezama

Kašnjenja su kritična u stvaranju dinamike. Ona daju inerciju sustava, mogu stvoriti oscilacije i često su odgovorni za kompromise između kratkoročnih i dugoročnih učinaka politike. Uzročni dijagrami trebali bi uključivati kašnjenja koja su važna za dinamičku hipotezu ili značajna u odnosu na vremenski horizont. Kašnjenja uvijek uključuju strukture stanja i protoka, a ponekad je važno pokazati eksplicitnost tih struktura u dijagramima. Često je dovoljno ukazati na prisutnost vremenskog kašnjenja u neformalnoj vezi bez izričitog pokazivanja strukture stanja i toka. Slika 7 prikazuje kako su vremenska kašnjenja prikazana u uzročnim dijagramima. Kada cijena raste, ponuda će se povećavati, ali često tek nakon značajnih kašnjenja, dok se novi kapaciteti naručuju i grade i dok nove tvrtke ulaze na tržište.



Slika 7. Kašnjenje u uzročnom dijagramu (prilagođeno iz (Sterman, 2000))

4.1.7 Grafički dizajn dijagrama

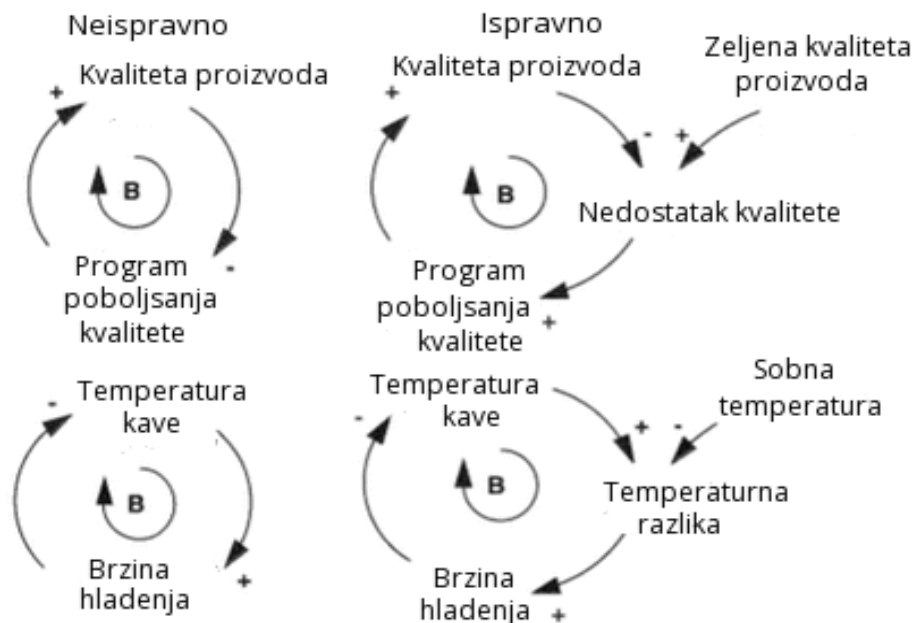
Da bismo maksimalno povećali jasnoću i utjecaj svojih uzročnih dijagrama, trebamo slijediti neka osnovna načela grafičkog dizajna. Moramo koristiti zakrivljene linije za povratne informacije jer one pomažu čitatelju da vizualizira petlje povratnih informacija. Neka važne petlje imaju kružne ili ovalne staze. Dijagrami se moraju organizirati kako bismo smanjili križanja linija u dijagramu. Kružnice, šesterokuti ili drugi simboli se ne stavljaju oko varijabli u uzročnim dijagramima.

Ne smiju se stavljati sve petlje u jedan veliki dijagram. Kratkoročna memorija može držati do 9 informacija odjednom. Velik dijagram s puno informacija može biti savršeno razumljiv osobi koja ga je nacrtala, ali ne i ljudima s kojima autor želi komunicirati. Rješenje je izgraditi svoj model u fazama s nizom manjih dijagrama uzročnih petlji. Malo ljudi može razumjeti složeni uzročni dijagram, stoga bi bilo najbolje da svaki dijagram odgovara jednom dijelu dinamičke priče.

Dijagrami uzročnih petlji osmišljeni su tako da komuniciraju sa središtem povratne veze dinamičke hipoteze, a nisu namijenjeni da budu opisi modela na detaljnoj razini jednadžbi. Previše detalja otežava uvid u cjelokupnu strukturu povratne petlje, interakciju različitih petlji, shvaćanje logike i procijene vjerodostojnosti i realnosti modela.

4.1.8 Eksplicitni ciljevi

Ciljevi su željeno stanje sustava i mogu se mijenjati tijekom vremena i reagirati na pritiske u okolini. Prvi primjer prikazuje negativnu petlju koja utječe na kvalitetu proizvoda tvrtke. Što je kvaliteta niža, započet će se program poboljšanja kvalitete, a nedostaci u kvaliteti bit će ispravljani. Izražavanje ciljeva negativnih petlji posebno je važno kada petlje zahvaćaju ljudsko ponašanje, no važno je izričito predstaviti ciljeve čak i kada petlja uopće ne uključuje ljude. Drugi primjer prikazuje negativnu povratnu informaciju kojom se šalica kave hladi do sobne temperature. Brzina hlađenja je proporcionalna razlici između temperature kave i sobne temperature. Hlađenje se zaustavlja kada su dvije temperature jednake. Ovaj temeljni zakon termodinamike jasno je razjašnjen kada je cilj eksplicitno prikazan.



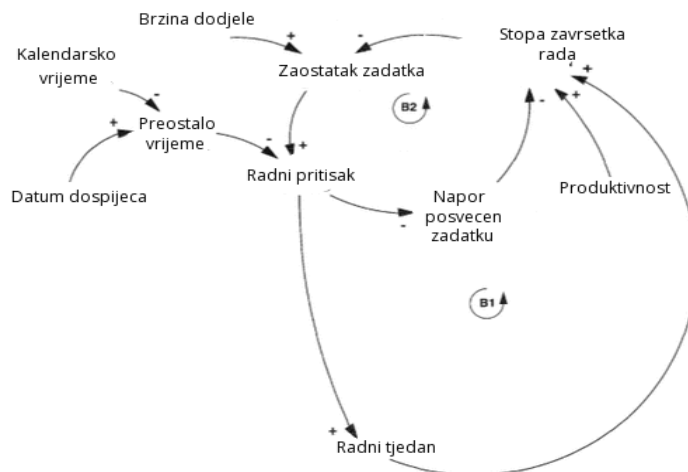
Slika 8. Ljudska agencija ili prirodni procesi mogu odrediti ciljeve (prilagođeno iz (Sterman,2000))

4.1.9 Stvarni i percipirani uvjeti

Često postoje značajne razlike između stvarnog stanja stvari i percepcije tog stanja. U primjeru upravljanja kvalitetom mogu postojati značajna kašnjenja u procjeni kvalitete i promjeni mišljenja uprave o kvaliteti proizvoda. Odvajanje percipiranog i stvarnog stanja pomaže u postavljanju pitanja kao što su: Koliko je potrebno mjeriti kvalitetu? Je li potrebno promijeniti mišljenje uprave o kvaliteti čak i nakon što su podaci dostupni? U sustavu izvještavanja može postojati pristranost pa se kvaliteta sustava može razlikovati od kvalitete koju doživljava klijent. Kupci ne podnose jamstvene zahtjeve za sve probleme ili pak prijavljuju sve nedostatke svom prodajnom predstavniku. Osoblje prodaje i popravka ne može prijaviti sve pritužbe kupaca.

4.2 Primjer dijagrama

U ovom poglavlju će se na primjeru zadatka pokazati kako se razvija dijagram uzročnih petlji. Promotrimo sliku 9 gdje pretpostavljamo da je brzina dodjele zadatka egzogena²: Nakon što se učenik prijavi za skup tečajeva, onda se nakon toga određuje brzina dodjele. Zaostatak zadatka povećava se za brzinu dodjele i smanjuje za stopu dovršetka. Stopa dovršenosti je radni tjedan koji se množi sa vremenom produktivnosti koje je uloženo za rješavanje zadataka. Napor posvećen zadacima je napor koji student ulaže u usporedbi s naporima potrebnim za dovršenje zadatka uz visoku kvalitetu. Ako je radni pritisak visok, učenik može brzo nešto pročitati, preskočiti nastavu ili dati manje cjelovite odgovore na pitanja u zadacima. Radni pritisak određuje radni tjedan i napor posvećen zadacima. Radni pritisak ovisi o zaostatku zadatka i preostalom vremenu za dovršenje posla. Ukoliko imamo veći zaostatak ili manje preostalog vremena, tada nam treba više vremena u radnom tjednu da bi se posao dovršio na vrijeme. Preostalo vrijeme je razlika između datuma dospijeca i trenutnog kalendarskog datuma. Student ima dvije opcije koje mu se nude ako su suočeni s visokim radnim pritiskom. Jedna od tih mogućnosti je da se radi duže, a time se povećava stopa završetka rada i brže se smanjuje rad zadatka. Druga mogućnost je da troši manje vremena na svaki zadatak čime se ubrzava stopa završetka i smanjuju zaostaci. Obje mogućnosti su negativne povratne informacije kojima je cilj smanjiti radni pritisak na podnošljivu razinu.



Slika 9. Osnovne kontrolne petlje za zaostatak zadatka (prilagođeno iz (Sterman, 2000))

Primjerice petlja kontrole kvalitete pretpostavlja da se napor povećava kada ocjene padaju u odnosu na studentske aspiracije. Bilo bi jasnije specificirati te aspiracije, na primjer, stvaranjem varijable željena prosječna ocjena. Tada bi na učenike utjecalo zadovoljstvo ocjenom

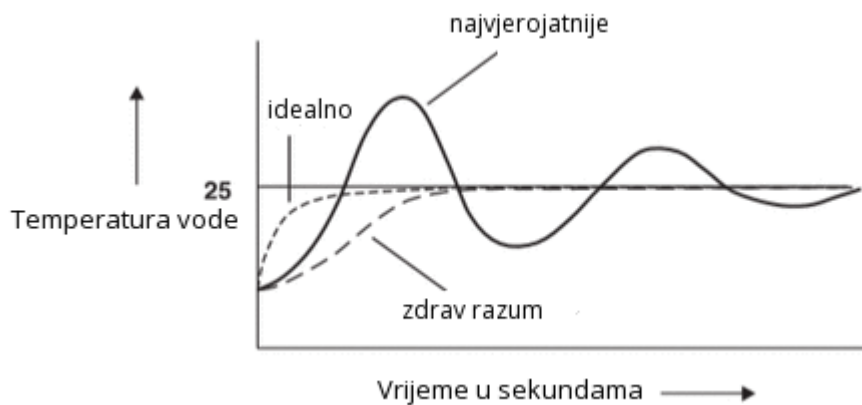
²Egzogena – nešto što je izvanjskog podrijetla ili je uzrokovano izvanjskim uvjetima

učenika koji mjeri jaz između željenih i stvarnih ocjena. Izričiti cilj za ocjene olakšava istraživanje dinamike za učenike s različitim aspiracijama i stavovima o važnosti ocjena. Različiti pritisci za postizanje, izvan modela upravljanja radnim opterećenjem, stavljaju pritisak na ocjene prema gore. Takvi pritisci proizlaze iz zapažanja o ocjenama koje vršnjaci primaju, od roditelja ili od zahtjeva budućih poslodavaca ili službenika za upis na fakultet.

4.3 Struktura i ponašanje kroz vrijeme – povratne petlje i njezina dinamika

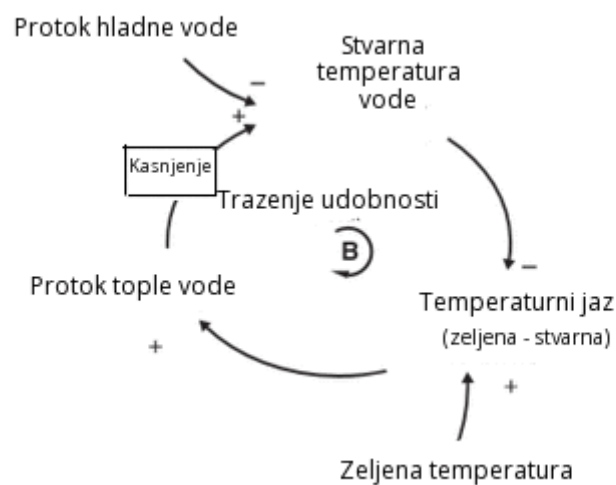
Dijagrami uzročnih petlji su neizbježan faktor za tumačenje i komuniciranje dinamike ili izvedbe kroz vrijeme. Najbolji način za objasniti je navesti primjer, a ovdje predstavljam tuš s toplom vodom kao onaj koji imamo kod kuće ili u hotelskoj sobi. U ovom primjeru najprije polazimo od dinamike interesa, a zatim konstruiramo dijagram uzročnih petlji koji objašnjava dinamiku. Na slici možemo vidjeti vremenski grafikon gdje se na vertikalnoj osi nalazi temperatura vode tuša, a na horizontalnoj osi vrijeme u sekundama. Zamislimo da je vrući ljetni dan i da se želimo ohladiti na $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kada se krećemo tuširati voda je na početku previše hladna.

Vremenski grafikon prikazuje tri alternativne vremenske staze. Idealan ishod je da brzo podesimo postavku slavine na točnu temperaturu te da se temperatura odmah podigne na željenih $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nakon toga temperatura bi trebala ostati nepomična. Naš razum kaže da se ovaj ideal ne može postići, zato što većina tuševa radi na sporijem principu. Na početku je voda hladna, a zatim nakon nekog vremena temperatura počinje rasti i vrlo brzo se smiruje na željenih $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Najvjerojatnija odnosno prosječna putanja je sasvim drugačija. Temperatura je opet na početku hladna, a kada podesimo slavinu temperatura postupno raste. Nakon nekoliko sekundi temperatura je u redu, ali ona nastavlja rasti gdje će doći do razine kad postaje previše vruća, a mi ćemo tada obrnuti slavinu. Napokon temperatura počinje padati i nakon još nekoliko sekundi ponovno dolazi do ugodnih $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Udobnost je nažalost kratkotrajna jer temperatura vode nastavlja padati te se vraćamo na početno stanje gdje je bila previše hladna. Ciklus se nastavlja od hladnog do vrućeg i obrnuto.



Slika 10. Zbunjujuća dinamika sporog reagiranja tuša (prilagođeno iz (Morecroft, 2015))

Prosječna putanja je klasičan primjer zbunjujuće dinamike. Iz slike se jasno vidi da dinamičko ponašanje traži neki cilj. Osoba koja se tušira želi da temperatura vode bude 25°C, ali stvarna temperatura vode varira oko tog cilja. Struktura povratne veze s takvim fluktuirajućim ponašanjem je balansirajuća petlja s odgađanjem, a to je upravo ono što tražimo u modeliranju ili predstavljanju sustava tuširanja.



Slika 11. Dijagram uzročnih petlji sporog reagiranja tuša (prilagođeno iz (Morecroft, 2015))

Na slici 11 je prikazan dijagram uzročnih petlji za sporo reagiranje tuša. U dijagramu se nalazi pet riječi, a to su željena temperatura, stvarna temperatura vode, temperaturni jaz, protok tople vode i protok hladne vode. Razmotrimo uzročne veze. Temperaturni jaz ovisi o razlici između željene i stvarne temperature vode, a postojanje temperaturnog jaza utječe na protok tople vode. Ova veza predstavlja donošenje odluke i naknadno djelovanje osobe koja se tušira. Možemo zamisliti osobu koja okreće slavinu kako bi promijenila protok vruće

vode. Protok tople vode tada utječe na stvarnu temperaturu vode, ali s vremenskim zakašnjenjem jer znamo da tuš reagira sporo. S lijeve strane imamo još jednu vezu, a to je dotok hladne vode. Temperatura vode očit ovisi o oba protoka vode. Krajnji rezultat je balansirajuća povratna petlja, označena kao "traženje udobnosti", a to je ono što tražimo da objasnimo cikličko ponašanje. Tip petlje se može potvrditi dodavanjem znakova svakoj vezi i pripovijedanju "priče" o procesu podešavanja temperature oko petlje. Zamislite da osoba koja se tušira se osjeća previše hladno i temperaturni jaz je veći od nule. Sada razmotrite polaritet prve veze. Ako se temperature jaz poveća, tada protok tople vode postaje veći nego što je bio, a to je pozitivna veza prema konvencijama polariteta. U drugoj vezi ako se protok tople vode poveća, tada se stvarna temperatura vode povećava te je to također pozitivna veza. U trećoj i posljednjoj vezi ako se temperatura vode poveća, temperaturni jaz postaje manji nego što bi inače bio, a to je negativna veza prema konvencijama polariteta. Sveukupni učinak oko petlje je povećanje temperaturnog jaza kako bi se došlo do smanjenja temperaturnog jaza odnosno balansiranja.

U našem slučaju postoji jedna negativna veza oko petlje (između stvarne temperature vode i temperaturnog razmaka) pa je to petlja za balansiranje. Druga negativna veza u dijagramu (između protoka hladne vode i stvarne temperature vode) se ne računa jer nije dio zatvorene petlje.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazano je kako funkcioniraju sustavite koliko su zapravo važne njihove karakteristike. Posebno su izdvojeni složeni sustavi i problem s kojima se suočavaju zbog svoje kompleksnosti. Dijagrami uzročnih petlji pomažu u fazi modeliranja, zbog toga što prikazuju mentalne modele. Bitno je slijediti smjernice za crtanje tih dijagrama jer mnogi ljudi ne mogu isčitati kompleksne uzročne dijagrame. Iz tog razloga je poželjno da se napravi dijagram za svaku petlju. Svaka veza koja se nalazi u dijagramu mora imat uzročan odnos s varijablama. Polaritet veze može biti pozitivan ili negativan.

Sva pojašnjena u tekstu popraćena su primjerima kako bi se doprinjelo razumijevanju pojmova i povezivanju sa situacijama iz stvarnog života.

6. POPIS SLIKA

<i>Slika 1. Primjer i ključ za zapis dijagrama uzročnih petlji (prilagođeno iz (Serman, 2000))</i>	18
<i>Slika 2. Dijagrami moraju uključivati samo istinske uzročne veze (prilagođeno iz (Serman, 2000))</i>	20
<i>Slika 3. Oznake veze i polariteti petlje (prilagođeno iz (Serman, 2000))</i>	21
<i>Slika 4. Imenovanje i brojanje petlji (prilagođeno iz (Serman,2000))</i>	23
<i>Slika 5. Ime varijable mora biti imenica ili imenska fraza (prilagođeno iz (Serman, 2000))</i>	23
<i>Slika 6. Ime varijable mora imati značenje povećanja ili smanjenja (prilagođeno iz (Serman,2000))</i>	24
<i>Slika 7. Kašnjenje u uzročnom dijagramu (prilagođeno iz (Serman, 2000))</i>	24
<i>Slika 8. Ljudska agencija ili prirodni procesi mogu odrediti ciljeve (prilagođeno iz (Serman,2000))</i>	26
<i>Slika 9. Osnovne kontrolne petlje za zaostatak zadatka (prilagođeno iz (Serman, 2000))</i>	27
<i>Slika 10. Zbunjujuća dinamika sporog reagiranja tuša (prilagođeno iz (Morecroft, 2015))</i>	29
<i>Slika 11. Dijagram uzročnih petlji sporog reagiranja tuša (prilagođeno iz (Morecroft, 2015))</i>	29

7. LITERATURA

- Draper L. Kauffman, Jr. Systems One: An introduction to systems thinking. Future Systems: 1980.
- Sterman, J. H: Business dynamics. Irwin McGraw-Hill: 2000.
- Morecroft, J. D. W.: Strategic modelling and business dynamics. John Wiley and Sons Ltd.: 2015.