

KOMPLEKSSÜSTEEMID

Jüri Engelbrecht

Üks kõige arenenum tänapäeva Lääne tsivilisatsiooni oskusi on tükeldamine: see on probleemide lahkamine nende kõige väiksemateks komponentideks või osadeks eesmärgiga neist aru saada ja lahendada. See oskus on meil ülihea. Nii hea, et me sageli unustame osad panna tagasi kokku tervikuks.

Armin Toffler, 1984

Viimase 60-70 aasta jooksul on teaduse arengus olnud mitu võtmesõna, mis huvitaval kombel kõik algavad k-tähega: küberneetika, katastroofiteooria, kaos ja kompleksüsteemid. Inglise keeles vastavalt 4c'd: *cybernetics, catastrophe theory, chaos, complex systems*. Jättes kõrvale selle sõnamängu, on huvitav mõtiskleda neil teemadel, püüdes eeskätt aru saada kompleksüsteemidest.

Alustada võiks küsimusega: mis eristab kompleksüsteemi lihtsast? Ehk mis on keerukus ja lihtsus? Vanemad sõnaraamatud annavad "lihtsa" seletuse – lihtsal süsteemil või asjal on vaid üks element ja keerukal - rohkem osiseid või elemente. See ei vii meid aga palju edasi, kahtles ju ka Alice Imedemaal, kas sõnad võivad tähendada erinevaid asju. Seletuse otsimisel ja sügavuti minekul tasuks alustada igapäeva elust. Me ju kogeme ühtelugu, et mõju ja selle tagajärg on võrdelised ja toidukorvi kogutud asjade hinnad summeeritakse kassas lõppsummaks. Insenerid teavad, et Hooke'i seadus seob pinget ja deformatsiooni võrdeliselt ning voolutugevus ja pinge on võrdelised. Nii need kui mitmed teised protsessid, mis igapäevaelus meid ümbritsevad on lineaarsed, determineeritud, st ette ennustatavad ja tasakaalulised. Eriti hea on ka asjaolu, et väike muutus alghäirituses põhjustab tulemis ka ainult väikesi muutusi. Maailm on aga tunduvalt keerulisem ning tihti on raske protsesside või nähtuste kulgu isegi ennustada. Kliimamuutused ja isegi ilmaennustamine, turbulents, inimaju tegevus, geneetilised muutused, elusolend kui tervik, majandus ja rahandus, ökosüsteemid ja palju muudki nõuavad aga hoopis komplitseeritumat mõju ja selle tulemi analüüsi, kui seda lubavad lihtsad võrdelised seosed.

Füüsikas ja matemaatikas on oluliseks valdkonnaks kujunenud mittelineaarne dünaamika, so mittelineaarsete protsesside uurimine (Lepik ja Engelbrecht, 1999). Mittelineaarsus ütleb otsesõnu – lineaarsus ei kehti! Sellest eitusest tulenevalt läheb elu põnevaks! Tuleb välja, et mittelineaarsete süsteemide käitumist ei saa teinekord ette ennustada, on võimalik kaos, millega kaasneb arusaam protsesside determineeritusest üldse. See aga on paradigmaatilise tähtsusega. Tõepoolest, pole ju mittelineaarsed seosed olulised mitte ainult füüsikas, vaid ka teistes teadusvaldkondades ja inimtegevuse sfäärides üldse. Nii on bioloogia, keemia, meditsiini, sotsiaalsfääri, majanduse jms puhul objektid harilikult äärmiselt keerulise sisestruktuuriga, et mittelineaarsuset pole lihtsalt pääsu. Ometi on elu ka mittelineaarses, mittetasakaalulises ja juhumuutlikkus maailmas võimalik, nagu kirjeldavad Jaan Kalda jt (2006) oma ülevaates. Mängu tulevad aga mõisted nagu iseorganiseerumine, juhumuutlikkus, mastaabi-invariantsus jm. Ühe sõnaga – tegemist on kompleksüsteemidega. Sõna „süsteem“ ise on siin kasutuses väga üldises käsitluses, tähendades näiteks nii füüsilist probleemi kui ka majandusmudelit, nii elusraku käitumist kui ka inimsuhteid.

See termin – kompleksüsteemid – on viimasel ajal teadusringkondades leidnud laia kõlapinna, sest ta toob ühise nimetaja alla süsteemid, millele on omane nii

iseorganiseerumine kui ka adaptiivne käitumine, nii komponentide vastastikmõjud kui ka süsteemi järsud muutused. Ja ühised omadused võimaldavad kasutada mitmeid universaalseid analüüsimeetodeid esimesel pilgul väga erinevate protsesside analüüsiks ja iseloomustamiseks.

Proovime loetleda kompleksüsteemide olulisi tunnusoone:

- kompleksüsteemid koosnevad paljudest komponentidest, mis omavahel seostatud ja mõjutavad üksteist, tihti esineb hierarhilisus;
- kompleksüsteemide käitumine on reeglina kirjeldatav mittelineaarsete (ei kehti võrdelisus) seostega komponentide vahel;
- kompleksüsteemid võivad olla iseorganiseeruvad uuteks struktuurideks uute omadustega, mis pole otseselt tuletatavad komponentide omadustest;
- kompleksüsteemid võivad omada mälu (st mäletavad, mis juhtus minevikus) ja olla adaptiivsed;
- kompleksüsteemid on ajas muutuvad ja tihti termodünaamilises mõttes mitetasakaalulised;
- kompleksüsteemide lokaalsed muutused arenevad tihti globaalseteks.
- kompleksüsteemid muutuvad toimuvad tihti korra ja kaose piirimail ja väikesed süsteemi alghäiritused võivad tekitada globaalseid muutusi.

Ja nii saamegi teatud ühisjooni leida turbulentsil ja aktsiaturgudel, ökosüsteemide arengus ja faasiüleminekutes, sotsiaalsete süsteemide käitumises ja maavärinate tekkeprotsessides. Loetelu võiks jätkata ning lisainfot võib huviline leida nii viimasel ajal publitseeritud raamatutes kui ka guugeldades. Kui otsida eestikeelset terminit „komplekssüsteemid“, annab guugeldamine umbes 4000 viidet, inglise keelt kasutades ja otsides terminit „*complex systems*“ on tulemiks pea 45 miljonit viidet.

Võib kohe küsida, kas tõesti alles nüüd, arvutiajastul, on hakatud aru saada kompleksüsteemidest ja nende olulisusest. Nagu ikka, pakub tagasivaade teadusajaloole hulgaliselt ainekseid kompleksüsteemide ühest või teisest ilmingust. Eks juba vanad kreeklased mõtisklesid maailma keerukuse üle ning mõned nende tähelepanekud on väga sügava sisuga. Olen ise korduvalt kasutanud Aristoteelse sõnu „tervik on suurem kui tema osade summa“. Ning paarisaja aasta vanused mõtted kõlavad juba üpris kaasaegselt. Hiljuti ilmus kogumik valitud artiklitest teemal „komplekssüsteemid“, kuigi nendes kasutatud terminid olid tänasele pilgule ehk veidi kohmakad (Juarrero ja Rubino, 2008). Nimetatud kogumik haarab kirjutisi I.Kanti, J.S.Milli, C.P.Peirce'i, H.Poincaré, E.Schrödingeri jpt sulest. Ühel või teisel moel olid nende mõtted heaks pinnaseks tänaste arusaamade kujundamisel, kuigi ehk oma kaasaegsete poolt need head mõistmist ei leidnud. Mõistmine on võtnud aega, sellest ka need loo alguses nimetatud neli k'd. Tagasiside olulisus sai arusaadavaks küberneetika ideede võidukäigus, kus olulist rolli omas Norbert Wiener. Katastroofiteooria ilmestas aga järskude muutuste „anatoomia“ ning näitas pidevate ja hüppeliste muutuste olemust mittelineaarsete funktsioonide analüüsi abil. Kaoseteooria pani omakorda korraliku aluse matemaatilisele aparaadile, mis võimaldas mõista determineeritust ning kaost kui füüsikalisi mõisteid.

Jätame aga kõrvale ajaloolise arengu ja vaatame nüüd näiteid, mis demonstreerivad kompleksüsteemide olemust ja rikkust.

Eesti keeles on kompleksüsteemidest juttu olnud päris mitmel korral ajakirjas „Horisont“ - küll kliima muutustest ja merelainetest, küll majanduskriisidest ja DNA mutatsioonidest ning loomulikult ka kaootilistest protsessidest. Kaootiliste ja fraktaalsete protsesside kirjeldamisel on mitu „klassikalist“ näidet – Feigenbaumi diagramm, mis kirjeldab perioodi kahendumist, Lorenzi liblikas, mis kirjeldab atraktorit lihtsustatud atmosfäärimudelil, Mandelbroti fraktal ehk piparkoogimehike,

mis kujutab endast ühe hästi lihtsa ruutteisenduse koonduvuspiirkonda, Smale'i hoburaud, mis iseloomustab pinna teisendust iseendaks läbi venitamise, voltimise ja lahtilõikamise, jne. Loomulikult on isikunimed seotud esmakirjeldajatega. Eraldi tuleks aga nimetada I.Prigogine'i ideid hajuvate struktuuride (ka dissipatiivseteks struktuurideks nimetatud) käitumisest (Prigogine ja Stengers,1984). Hajuv struktuur on termodünaamiliselt avatud süsteem, mis vahetab ümbritseva keskkonnaga energiat ja ka massi, olles ise eemal termodünaamilisest tasakaalust. Taoline lähenemine võimaldab kirjeldada iseorganiseeruvaid süsteeme, kus süsteemi omavahel interakteeruvad osad on tugevalt korreleeritud käitumisega. Ja see ei piirdu mitte ainult füüsikaliste protsessidega, M.Wheatley (2002) on neid ideesid rakendanud ka organisatsioonide juhtimisel.

Komplekssüsteemide kirjeldamisel on üheks kenaks mudelülesandeks liivakuhik. Laseme näiteks peost kuiva liiva tasasele pinnale, olgu selleks mererand või laboratooriumilaud. Peotäiest liivast ei jätku pikemaks ajaks, seega võiks kujutada letrit, mis fikseerituna lubab liival pideva joana voolata. Arusaadavalt tekib pinnal liivakuhik. Kui liivakuhiku nõlva kaldenurk suureneb, ei jää liivaterakesed enam püsima seal kuhu nad kukuvad, vaid varisevad mööda nõlva alla. Oletame, et laud on ringikujuline, siis on ühel heal ajal liivakuhik parajasti nii kõrge, et varingus allaveerev liiv läheb üle laua ääre. Tegemist on termodünaamiliselt tasakaalustamata süsteemiga, mõned varingud on lokaalsed, mõned globaalsed. Sidudes koguenergia iga liivaterakese energiaga, saab kirjeldada süsteemi käitumist kui iseorganiseerivat kriitilisust. Vahemärkusena – taoline eksperiment oli mõne aasta eest üles seatud Helsinki Heureka teadusmuuseumis. Detailsema kirjelduse leiab huviline P.Baki igati ülevaatlikus raamatus (1997). Küsimusi on siin palju: kas varingut saab ennustada ja kas on olemas mingi reeglipärasus, mis määrab väikeste või suurte varingute esinemissageduse. Ning mis juhtub, kui muudame tingimusi ja võtame liivaterade asemel näiteks riisi (puht tehnoloogiline probleem toiduaine tööstuses).

P. Bak (1997) arutleb füüsika ja bioloogia kõrval ka protsessidest, kus osalisteks inimesed. Üks valdkond, mis meid kõiki huvitab, on majandus. Traditsioonilised majandusteooriad on seotud pidevate muutustega ja seetõttu füüsiliselt võrreldavad vee voolamisega. Makromuutujate keeles on taoline kirjeldus võimalik ja viib ka tahtmisele ennustada, kui palju kasvab SKP ja kui palju kasvab heaolu jne. Majandus on aga P.Baki sõnadel rohkem sarnane liivakuhiku käitumisega, sest tegemist on diskreetsete agentide, st isikute või kompaniide otsustega. See aga mõjutab nii lokaalseid sündmusi ühes või teises riigis, kuid nagu nüüd hästi teame, ka globaalseid muutusi. Jälle on küsimus selles, kas on tegemist mingite seaduspärasustega ja kas saab midagi ette ennustada. Ja kas on tunnuseid, mis võiks ennustada, et midagi juhtub.

Aga maavärinad on ju samuti inimkonnale suureks probleemiks. Tõsi, teame neid regioone, kus maavärina oht Maakera geoloogilise ehituse tõttu on suurem kui mõnes muus kohas, kuid sellest ei piisa. Maavärinate mehhanismi aitab seletada Burridge-Knopoffi mudel, mis koosneb kahe plaadi, ühe paigalseisva ja teise liikuva, vahel asuvatest blokkidest, mis omavahel elastsete sidemetega on ühendatud. Kui üks blokkidest hakkab liikuma, siis teatud tingimustel ei suuda hõõrdejõud teisi blokke paigal hoida ning võib tekkida ahelreaktsioon ja liikuma hakkavad mitmed blokid st lokaalne liikumine tekitab globaalse liikumise. See lihtsustatud mudel võib seletada mehhanismi, kuid mitte taoliste globaalsete liikumiste ulatust ja suurust.

Näidetega võiks jätkata (vt Kalda jt, 2006; Bak, 1997; Mitchell, 2009 jne), kuid proovime leida, mis neid näiteid ühendab. Üks oluline mõiste on astmeseadus. Olgu suurus $N(x)$ sõltuv muutujast y järgmise valemiga: $N(x) = y^{-a}$, kus a on konstant. Kui

võtta selle võrduse mõlemast poolest logaritmi, siis tundub reeglite kohaselt saame tulemuseks $\log N(x) = -a \log y$. See seaduspärasus näitab, et kui konstrueerime graafiku telgedega $\log N(x)$ ja $\log y$, siis saame tulemuseks sirgjoone. Sellise tulemuse sai G.K.Zipf (1949) kui ta analüüsis sõnade esinemise sagedust inglise keeles. Pole vahet, näitas ta, kas valite tekstiks ajalehed, J.Joyce'i „Ulysses'i“ või hoopis Piibli – ikka saate tulemuseks astmeseaduse ja logaritmilises skaalas graafikuks sirgjoone. Maavärinate analüüs USA kagupiirkonnas aastatel 1974-1983 näitas, et maavärinate esinemissagedus ja nende magnituudid on samuti taolise astmeseadusega seotud. Seda teame tänapäeval Gutenberg-Richteri seadusena. Burrige-Knopoffi mudeli analüüs näitab, et see lihtsustatud mudel kirjeldab olukorda, kus graafiku kuju sõltub blokkide arvust. Suurem blokkide arv sobib paremini Gutenberg-Richteri seadusega, st ka suuremad magnituudid (energia vabanemine) sobivad paremini sirgjoonele. Pole sugugi üllatav, et ka varingud liivakuhikul on samuti kirjeldatavad astmeseadusega. Hiljuti näitasid aga R.Kitt jt (2009), et ka finantsturgude suurte kõikumiste puhul kehtib teatud astmeseadus.

Ühtsete seaduspärasuste esinemine ei ole puhas juhus, selle taga on looduse käitumine kompleksüsteemina (vt ülal kompleksüsteemide tunnused). Varustatud teadmiste ja meetoditega mittelineaarsest dünaamikast, fraktalite teooriast ja statistilisest füüsikast on võimalik analüüsida paljusid looduslikke ja tehissüsteeme. See nimekiri on pikk alates atmosfäärfüüsikast kuni kliima muutumiseni, iseorganiseerumisest bioloogilistes süsteemides kuni kiipide kasvatamiseni nanoskaalas, rakubioloogiast kuni evolutsioonini, närvitalitusest kuni südamerütmideni, internetist kuni sotsiaalsete süsteemide käitumiseni ja nii edasi.

Kui siiani rääkisime protsessidest, siis oleks vaja veel veidi rääkida struktuuridest. On ju päris lihtne intuiitiivselt ette kujutada, et kui osad (elemendid, komponendid,...) on mingi moega seostatud, siis peaksid need moodustama teatud struktuuri või võrgustiku. Meie aju on ehk parim näide triljonitest neuronitest ja ühendustest nende vahel, väike ärritus paneb ta tööle ja mõttetöö tulemiks on uus kvaliteet. Tehissüsteemidest on tänapäeval suurepärane näide internet - miljonid arvutid ühendatud kaablitega üle terve maailma. Aastal 1998 koostasid Bill Cheswick ja Hal Birch interneti „kaardi“ sõlmede ja ruuteritega, mis moodustasid hierarhilise detsentraliseeritud võrgustiku. Selle põhjal tuvastati, et hoolimata geograafilisest kaugusest, on tüüpiline teede arv, mida mööda sõnum jõudis punktist A punkti B vaid neli, sõlmede ja ruuterite sõltuvus järgis aga astmeseadust. Mis saab aga siis, kui võrgustikus puuduvad neuronid või ülekandeliinid? Ka siis ilmnevad esimesel pilgul üllatavad seaduspärasused. Maailm oma miljardite asukatega on tegelikult väike! Tegemist on sotsiaalse võrgustikuga, kus igaühel on oma tutvusringkond. Samas, nii üllatav kui see ka pole, ühte inimest lahutab teisest kaugel teises maailmanurgas vaid „kuus käepigistust“, olgu see meilt Euroopast vaadatuna keegi Hiina kiltmaa elanik, Amazonase vihmametsade pärisasukas või USA president. Väiksem sotsiaalne kooslus annab veelgi väiksema sidemete arvu, näiteks filminäitlejate seosed omavahel, väljendatuna filmide arvu abil, kes kellega ühes filmis esines. Selliste võrgustike teoreetiline kirjeldus saab suurt abi graafiteooriast, mis käsitleb hulgas olevate elementide seostatust. Jättes kõrvale graafiteooria sisuka ajaloo, kus on ka Leonhard Euler oma Königsbergi seitsme silla probleemiga, on võrgustike ja „väikese maailmaga“ seotud Ungari matemaatiku Paul Erdöse (1913-1996) uuringud juhuslike graafide omaduste selgitamisel. Kõrvalepõikena on huvitav ka nn Erdöse arv. Nimelt paistis Erdös silma oma suure arvu kaasautorite poolest, üldse avaldas ta väidetavalt ca 1500 teadusartiklit. Kui kolleeg-matemaatik on olnud Erdöse kaasautor, siis on tema Erdöse arv 1. Kui teadlane on koos Erdöse kaasautoriga avaldanud

ühisuuringu tulemused, on tema Erdöse arv 2, jne. Eks see ole jälle üks teatud võrgustik, mis iseloomustab ühte teadlaste kooslust.

„Väikese maailma“ sisuka käsitluse võib leida S.Strogatzi ja D.J.Wattsi tööst, kelle 1998 a avaldatud Nature artikkel pani paika põhimõtted. S.Stogatzi (2003) raamatust saab huviline leida aga pikema ja põhjalikuma kirjelduse, kuidas on organiseeritud „väikesed maailmad“, kui kaugel on võrgustikus toimuvad protsessid kaosest, kuidas sünkroniseerivad oma signaale jaanimardiklased ja palju muudki.

Kui sotsiaalne võrgustik on midagi sellist, mida iseloomustab vaid mõtteline side, siis võrgustiku elemendid võivad olla ju ka pidevas liikumises. Selline probleem on näiteks linnu- või kalaparvede käitumine. Küllap on paljud märganud, kuidas linnuparved taevas keerutavad, ikka tihedalt parves ja ometi ei pörka linnud omavahel kokku. Allakirjutanu oli paari aasta eest lummatud sellest nähtusest Roomas, kui linnuparved joonistasid kummalisi mustreid õhtupäikesest värvitud pilvede foonil. Jättes kõrvale ökoloogilise tausta, võib küsida, kas on olemas reeglid liikumisel, mis lubavad nii lindudel kui ka kaladel taoliselt „liigelda“? Jah, tõepoolest on. Craig Reynolds on need reeglid väga lihtsalt paika pannud (vt võrgust Craig Reynolds, Boids). Iga lind (kala) parves hoiab distantsi naabritest, liigub naabrite liikumise keskmise suuna järgi (st joondub) ja liigub naabrite keskmise asendi poole. Ja nii toimib liikumine nii õhus kui ka vees ilma et toimuks kokkupõrkeid.

Kui projekteeritakse tehissüsteeme, siis oleks samuti vaja vältida kokkupõrkeid ja süsteemi osad peaksid töötama seostatult. Nii võiks küsida ka arvutiprogrammide kohta. Laialt levinud arusaam, et iga programm töötab omaette ja käivitub siis kui keegi vastava käsu annab, on ülaltoodu valguses ilmselt liiga lihtne käsitlus, hoolimata et paljude meelest arvutid just nii toimivadki. Tegelikult on arvuti tänapäeva rakendustes tihti vahetus interaktsioonis keskkonnaga, mis nende poolt täidetavaid programme juhivad ja mille omadused on teada vaid osaliselt. Veelgi enam, arvuti ja tarkvara komponentide vahelised põhjuslikud seosed on samuti teada osaliselt ja põhimõtteliselt võib olla mitu simultaanset ja omavahel infot vahetavat arvutusvoogu. Seetõttu on teadlased huvitatud proaktiivsetest arvutisüsteemidest, situatsiooniinfo kogumisest, interaktiivsete situatsiooniteadlike arvutusmodelite arendamisest, spontaanvõrkudest ja paljudest muudest probleemidest, mis teisisõnu tähendaks arvutiteaduse, süsteemiteooria ja kompleksüsteemide sümbioosi. Põhimõtteks ikka ja jälle see, et komponendid koos pole lihtsalt liidetavate rollis, vaid nende koosmõjul tekib uus kvaliteet. See on aga otseselt üks kompleksüsteemide tunnus. Rakenduste haare on lai – meditsiiniseadmete, tehnoloogiliste protsesside juhtimissüsteemide, koduelektroonika funktsionaalsuse tagamine, majanduse, poliitika ja sotsiaalsete protsesside modelleerimine, jne.

Ülaltoodud näited selgitasid, et kompleksüsteemide käitumises saab selgelt tuvastada üldisi seaduspärasusi ning tihti on oma loomult erinevad protsessid ikka teatud mõttes sarnased. See viib paratamatult mõttele, et ühiskonda kui sotsiaalset kooslust saab ka nende meetoditega analüüsida ja kui see juba võimalik on, siis ka modelleerida ja tulemusi ette ennustada. Kui ajaloos tagasi vaadata, siis juba markii Condorcet, prantsuse 18.saj. poliitik, püüdis rakendada matemaatilist aparaati poliitika ja kultuuri arengu modelleerimisel (Baker, 1975). Páris hiljuti aga toimus OECD korraldusel 2008.a konverents kompleksüsteemide teooria rakendustest ühiskonnas (vt OECD Report, 2009). Konverentsil rõhutati, et teadmised kompleksüsteemide käitumisest peaksid olema ka poliitikute hariduse osa. On ju paljud sotsiaalsed, ökoloogilised, poliitilised ja majanduslikud süsteemid kvalifitseeritavad kui kompleksüsteemid. Tõepoolest, nimekiri iseloomulikest tunnustest ühiskonnale nii olulistes süsteemides on tõlgendatavad terminites, mis alguse saanud füüsikast või

matemaatikast, kuid omavad palju laiemaid rakendusi. Võrgustikud, nagu nendest ülal juttu oli, on ju iseloomulikud inimkooslustele. Millised protsessid toimuvad sellises võrgustikus? Kuidas käituvad tehisevõrgustikud, näiteks energialiinid, kui mingid liinid katkevad? Kuidas käitub iseorganiseeruv majandus? Kas turg otsustab kõik ning mis juhtub, kui turg lakkab töötamast? Eks me ju teame, mida see tähendab oma viimaste aastate kogemustest, kuid kuhu ulatuvad tagajärjed? Kas toimub iseorganiseerumine ja adaptiivne käitumine, nagu me teame füüsikast või füsioloogiast, või tuleb rakendada välisimpulsse, st juhtida protsessi? Kas iseorganiseeruva kriitilisuse fenomen nagu liivakuhiku varingutes ilmneb, võiks iseloomustada ka nähtusi ühiskonnas, näiteks miks kaotavad ühed või teised avalikud institutsioonid usalduse (valitsused, pangad, jne)? Kas astmeseaduse tundmisest on kasu majandussüsteemides või katastroofide ennustamisel, mis võivad haarata suurt osa ühiskonnast? Ja kuidas inimtegevus, kasvõi indiviidi tasemel võib vallandada ebameeldivaid protsesse ühiskonnas laiemalt. Ega OECD konverents piisavaid vastuseid ei andnud, piirduti üldmõistete seletamisega ja mõne eduloo kirjeldamisega. Rõhutati agent-mudelite tähtsust ja võrgustike seostatust, sealhulgas ka informatiivset seostatust. Edulugudena oli juttu epidemioloogia mudelitest, liikluse korraldusest, finantsturgudest jm. Saksamaa valitsus koos Saksa pangaga on aga koostanud majandusmudeli oma maa tarbeks, jälgides kompleksüsteemide ideoloogiat. Selle mudeli kohaselt on paika pandud mehhanismid, mis võimaldaksid kasvuhoonegaaside emissiooni vähendada umbes 40 % võrra aastaks 2020. Nii või teisiti, teadlaste ja poliitikute dialoog on äärmiselt oluline. Küllap kuuleme nendest probleemidest lähemal ajal veelgi.

Kui nüüd pöörata pilk kodustele radadele ja küsida kes mida teeb, siis on meil olemas Mittelineaarsete Protsesside Analüüsi Keskus TTÜ Küberneetika Instituudis, mis rahvusvahelise keskusena on rohkem tuntud inglisekeelse akronüümi CENS (*Centre for Nonlinear Studies*) nime all. Loodud kümnekonna aasta eest (1999), oli CENSi ideeks koondada ühte need teadlased, kes tegelevad mittelineaarsete protsesside uurimisega sõltumata traditsioonilistest teadusvaldkondadest või teadusklassifikatsioonist. Nii olid algselt CENSi raames uuringute objektiks laineleviprobleemid, mittelineaarne dünaamika ja fotoelastsus, millele lisandusid biomeditsiinitehnika ja diferentsiaalgeomeetria. Loogilise sammuna läks tähelepanu ka fraktaalsetele protsessidele ja biofüüsikale. Viimasel ajal on teaduse sisemine loogika tõstnud esile just kompleksüsteemid, haarates analüüsi, sünteesi ja juhtimist. Struktuurselt tähendab see, et tugevale analüüsi suunale lisandusid tehissüsteemide ja juhtimisteooria suunad.

Hulk varasemaid CENSi tulemusi peegeldab kompleksüsteemide iseärasusi. Nii on multiskaleeruv astmeseadus osutunud oluliseks reegliks, mis ühendab nii turbulentsi, südamerütme ja finantsturge (Kalda jt, 2006) ning on näidatud, kuidas turbulentsiteooria meetodeid saab kasutada südamerütmi muutlikkuse ja ja majanduslike ajajadade (nt aktsiahinnad) kirjeldamisel. Kuna kompleksüsteeme iseloomustab just mittelineaarne seostatus komponentide vahel, siis lainemehaanika pakub palju näiteid mittelineaarsuse kvalitatiivsest mõjust laineväljade tekkele, olgu nendeks siis interaktsioonisolitonid veepinnal (Soomere, 2009) või solitoni-tüüpi lained mikrostruktuursetes tahkistes (Salupere jt, 2003). Tahkiste erinevad faasid on seostatud selliselt, et termodünaamilised tingimused mängivad olulist rolli ja faasipiiride muutused dünaamilisel koormamisel on üllatavalt mitmekesised (Berezovski, 2004). Mittelineaarne fotoelastustomograafia lubab määrata pingevälja kui tensorvälja komponendid polariseeritud valguse mõõtmistulemustest, mis on viinud suurepärase rakendusteni (Aben jt, 2009). Biofüüsika on aga ilmeka näide,

kus vaja ühildada nii füsioloogia, keemia ja mehaanika, et kirjeldada südamerakkude käitumise energeetilist tagapõhja, mis viib südamelihase kontraktsioonini (Vendelin jt, 2007). Sünteesi valdkonda kuuluvad aga uuringud proaktiivsete arvutisüsteemide ja situatsiooniteadlike arvutusmodelite arendamisel lähtudes multiagentsüsteemide paradigmat (Mõtus, 2009). Juhtimisalased kompleksüsteemide uuringud haaravad põhiliselt mittelineaarseid ja robustseid juhtimissüsteeme (Pearson, Kotta, 2004). Populaarses vormis ülevaade CENS-i algusaastate tulemustest haarab põhiliselt analüüsi suunda (Kändler jt, 2006), millele loodame peatselt lisa üldisemas plaanis. See on aga vaid ühe keskuse lugu, kuid Eestis on ju ka hulk teisi valdkondi, nagu geneetilise informatsiooni analüüs, sotsiaalsete koosluste dünaamika jm, mis samuti kuuluvad kompleksüsteemide hulka.

Mis edasi? Maailma mastaabis on loodusteadlased oma uuringute käigus olnud igati edukad, alates I. Prigogine'i iseorganiseerumise põhimõtetest ja mittelineaarsuse rolli ning astmeseaduse olulisuse mõistmisest. Ka tehissüsteemide konstrueerimisel on saavutatud edu. Nagu aga näitas hiljutine OECD konverents, on ühiskonnal kui kompleksüsteemil palju probleeme, mille lahendamine nõuaks teadlaste abi. Eeskätt puudutavad need probleemid ühiskonna valupunkte. Nii võiks riigi kui kompleksüsteemi seisukohalt formuleerida suure hulga küsimusi. Kas riik koosneb osadest, millised need on ja kas osad peavad moodustama terviku? Kas osad riigis kui tervikus on seostatud ja mis sellest järgneb? Milline on informatiivse seostatuse ja seda saatva müra tähtsus? Kes analüüsib riiki kui kompleksüsteemi? On see üldse modelleeritav? Kuidas hinnata paljude otsuste ja tegevusstrateegiatega mõju ja seostatust? Ilmselt peame nende küsimustega tegelema tõsisemalt kui seni. Ometi ei piisa vaid teadlaste analüüsist, ühiskond ja eeskätt poliitikud peavad olema ka valmis aru saama ja teadlaste soovitusi rakendama.

Sel teemal toimus hiljuti ka Eesti Teaduste Akadeemia seminar „Riigi kui kompleksüsteemi analüüsitavusest“ (vt www.akadeemia.ee). Peaettekande pidas Leo Mõtus, kes seadis eesmärgiks arutelu kompleksüsteemide (ilmneva) käitumise analüüsimeetodite üle minevikus ja tulevikus, põhirõhuga erinevate abstraktsiooniastmega mudelite koosmõju uurimisel ja agentmudelite kasutamise otstarbekuse hindamisel. Hulk näiteid eksisteerivatest iseorganiseeruvatest agentmudelitest ja nende praktilisest kasutamisest USA erinevates asutustes illustreerisid agentmudelite võimsust kompleksüsteemide uurimisel.

Küsimus, kuidas puudutab see kõik Eestit, oli aluseks järgnevale diskussioonile. Lisaks oli seminari ettevalmistuse käigus ka osavõtjatele esitatud hulk küsimusi riigi kui terviku ning selle kui kompleksüsteemi analüüsi olulisuse kohta. Diskussioon tõstis esile hulga probleeme: sotsiaalse süsteemi ja biosüsteemi sarnasuse võimalikust analüüsist, alamsüsteemide (olgu selleks börs, ülikool, teadlarühm või majandusharu) modelleerimisest, info hankimisest alamsüsteemide ja nende omavaheliste seoste kohta, jne. Majanduse näitel väideti, et Eesti kui väikeriigi protsessid on äärmiselt mittelineaarsed. Kõlama jäi ka sotsiaalse süsteemi eesmärk – ellujäämine. Kuna taolises süsteemis on algtasandil tegemist indiviididega ja nende otsustega, siis on äärmiselt olulised ka väärtushinnangud. Mitmes sõnavõtus leidis toetust idee sõltumatu analüüsikeskuse vajalikkusest. Riigi kui kompleksüsteemi mudeli loomine pole eesmärk omaette, oluline on aga aru saada kompleksüsteemide käitumise põhimõtetest, nagu tagasiside erineva abstraktsioonitasemega mudelite (alamsüsteemide) vahel, süsteemi ja alamsüsteemide interaktiivse seose olulisus, süsteemi (globaalse) käitumise tahtliku muutmise vajadus, arvestades süsteemi tundlikkust algtingimuste väikestele muutustele, jne. Riigi analüüsitavuse parandamine eeldab kindlasti süsteemse hariduse tõhustamist ja interdistsiplinaarseid

teadusuuringuid (eriti kompleksüsteemide kontekstis), aga ka e-riigi kontseptsioonide edasiarendamist arvestades maailmas saadud uusi tulemusi kompleksüsteemide uurimisel. Põhimõtteliselt on Eestis need võimalused olemas, kuid selleks tuleb ületada praeguse korralduse jäikus mitmel tasandil.

Proovides pikka juttu kokku võtta, võiks kasutada John Gribbini sõnu (Gribbin, 2004). Kirjeldades kompleksüsteemi kui sügavat lihtsust, rõhutas ta kahte kandvat ideed – mittelineaarse süsteemi tundlikkust algandmete muutuse suhtes ja tagasisidet. Tõepoolest, neist alustades jõuame peagi keerukate seosteni ja arusaamadeni keerukuse ja lihtsuse sümbioosist. Kas aga on võimalik seda kõike hoomata? Oluline on ju eeskätt aru saada põhjustest ja võimalikest tagajärgedest. Pealegi rõhutavad tehissüsteemide uurijad, et lisaks sellele tuleb toime tulla puuduliku infoga nii komponentide omadustest kui ka nende seostatusest. Ometi on viimasel ajal hakatud paremini aru saama kompleksüsteemide käitumisest ja nende tähtsusest. Ka on senised teadmised kompleksüsteemidest juba kogutud entsüklopeediliselt (Meyers, 2009).

Teinekord tekib aga tunne, et inimkond teeb ise oma elu raskeks, sest hoolimata teadlaste jõupingutustest ei leia uued teadmised alati rakendust. Kas jääb üle vaid nentida nii nagu ütles Albert Einstein: „Lõpmatud on vaid maailmaruum ja inimlik rumalus, seejuures on mul kahtlused esimese lõpmatuse suhtes“? Ehk ongi see teine lõpmatus just peamine probleem, et asjad kompleksüsteemis, mida kutsume maailmaks, ei lähe nii nagu tahaksime? Ometi peavad asjad arenema ja küllap on arusaamade arengus ja mõistmises teatud analoogia S.Kauffmaniga (vt Gribbin, 2004) ehitada võrgustikku üksikute sõlmede vahel. Juhusliku valikuga hakatakse sõlmi paariviisi ühendama, teatud momendil satub valikusse sõlm, millel juba üks ühendus olemas, edasi hakkavad moodustuma klastrid (ühendatud on mitu sõlme) ja siis saabub teatud küllastus, mida võiks füüsikaliselt võrrelda faasiüleminekul. See vastab olukorrale, kus ühenduste arv ületab poole sõlmede arvust. Sellest alates, hoolimata ühenduste lisamisest klastrite suurus enam oluliselt ei muutu. Hea tahtmise juures ja jättes kõrvale nimetatud katse juhusliku valiku, võiks siin paralleeli tõmmata teadmiste omaksvõtmisega, mis selles kontekstis tähendaks järjekindlat ühenduste loomist ehk teisisõnu haridust, mis teatud tasemest alates loob mõistmise.

Kirjandus

- 1.Ü.Lepik, J.Engelbrecht, Kaoseraamat. Tallinn, TA Kirjastus, 1999
- 2.J.Kalda, R.Mankin ja R.Tammelo, Elu võimalikkusest mittelineaarses ja mitte-tasakaalulises juhumuutlikus maailmas. Teadusmõte Eestis. Täppisteadused, toim. I.Koppel, P.Saari. Tallinn, Eesti TA, 2006, 53-62.
3. A.Juarrero, C.A.Rubino (ed), Emergence, Complexity, and Self-Organization: Precursors and Prototypes. W Porter, ISCE Publ, 2008.
- 4.I.Prigogine, I. Stengers, Order out of Chaos. London, Heinemann, 1984.
- 5.M.J.Wheatley, Juhtimine ja loodusteadus. Korra otsingul kaootilises maailmas. Tartu, Fontes, 2002.
- 6.P.Bak, How Nature Works. The Science of Self-Organized Criticality. Oxford University Press, 1997.
- 7.M.Mitchell, Complexity. A Guided Tour. Oxford University Press, 2009.
- 8.G.K.Zipf, Human Behavior and the Principle of Least Effort. Cambridge MA, Addison –Wesley, 1949
- 9.R.Kitt, M.Säkki, J.Kalda, Probability of large movements in financial markets. Phys. A, Statistical Mechanics and its Applications, 2009, 388, 4838-4844.

10. S. Strogatz, *Sync, Rhythms of Nature, Rhythms of Ourselves*. London, Allen Lane, 2003.
11. OECD Report on Applications of Complexity Science for Public Policy: New Tools for Finding Unanticipated Consequences and Unrealized Opportunities, 2009 (www.oecd.org/sti/gsf).
12. K.M. Baker, *Condorcet: From Natural Philosophy to Social Mathematics*. Chicago, Chicago University Press, 1975.
13. T. Soomere, Solitons interactions. In: *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, ed by R.A. Meyers, Springer, 2009, vol 9, 8479-8504.
14. A. Salupere, J. Engelbrecht, P. Peterson, On the long-time behaviour of soliton ensembles. *Math. Comp. Simul.*, 2003, vol 62, 137-147.
15. A. Berezovski, Faasisiirdefrondid martensiitsetes tahkistes. Eesti Vabariigi teaduspreemiad, Eesti Teaduste Akadeemia, 2004, 48-57.
15. H. Aben, L. Ainola, A. Errapart, J. Anton, Integraalse fotoelastsusteooria, mõõtmistehnoloogia ja aparatuuri väljatöötamine ja rakendamine jääkpingete mõõtmisel klaasitööstuses. Eesti Vabariigi teaduspreemiad, Eesti Teaduste Akadeemia, Tallinn, 2009, 40-57.
16. M. Vendelin, V. Saks, J. Engelbrecht, Principles of mathematical modelling and in silico studies of integrated cellular energetics. In: *Molecular System Biology: Energy for Life*, V. Saks, ed., Wiley-VCH, Weinheim, 2007, 407-433.
17. L. Mõtus et al (eds), Research Laboratory for Proactive Technologies, Annual Report 2008. Tallinn: TUT, 2009.
18. R.K. Pearson, Ü. Kotta, Nonlinear discrete-time models: state-space vs input-output representation. *J. Process Control*, 2004, 14, 533-538.
19. T. Kändler, J. Engelbrecht, M. Kutser (toim), *Keeruka maailma ilu*. TTÜ Küberneetika Instituut, 2006.
20. J. Gribbin, *Deep Simplicity*. London, Allen Lane, 2004.
21. R.A. Meyers (Ed-in-Chief), *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. Vols 1-11, Springer, 2009.

Käesolev essee on kirjutatud TTÜ Küberneetika Instituudi 50. aastapäeva tähistamiseks, Instituut loodi 1. septembril 1960 Eesti Teaduste Akadeemia instituudina.

Avaldatud ajakirjas „Akadeemia”, 2010, N 8, 1347 – 1362.