

ELUTÄHTSATE TEENUSTE RISTSÖLTUVUSTE ANALÜÜS

*Peeter Laud, Hayretdin Bahşi, Aleksandr Lenin, Kalev Mändmaa,
Jaan Priisalu, Reedik Tuuling*



ÜLEVAADE. Artiklis on vaatluse all elutähtsate teenuste ristsõltuvuse analüüsi meetodid, mis toetavad laiapindset riigikaitset. Käsitlust leiavad teenuste ja nende vaheliste sõltuvuste modelleerimise ning mitmesammuliste sõltuvuste leidmise viisid. Väljapakutud meetoditega on tehtud esmased katsetused. Artiklis analüüsitakse nende katsetuste tulemusi ning antakse soovitusi meetodite praktiliseks kasutamiseks ja edasiseks tööks.

Võtmesõnad: elutähtsad teenused, ristsõltuvused, modelleerimine, matke

Keywords: life-critical services, cross-dependencies, modelling, simulation

1. Sissejuhatus

Laiapindse riigikaitse üks osa on olukorrateadlikkus riigis toimuva ja selle võimaliku mõju kohta. Olukorrateadlikkuse üks olulisi objekte on elutähtsate teenuste hetkeseis ja prognoos. Manticus Apollo projekti aluseks olevas uurimisülesandes oli elutähtsate teenuste ristsõltuvuste väljaselgitamine üks oodatavatest tulemustest¹. Sooviti, et analüüs „[oleks] tehtud selliselt, et katkestuste korral oleks võimalik saada ülevaade elutähtsa teenuse mõju- piirkondadest ja mõjutatavatest komponentidest (teenused, infrastruktuur, andmed jm)“².

Elutähtis teenus on hädaolukorra seaduses määratletud teenusena, „millel on ülekaalukas mõju ühiskonna toimimisele ja mille katkemine ohustab vahetult inimeste elu või tervist või teise elutähtsa teenuse või üldhuviteenuse toimimist“³. Sealsamas on esitatud ka elutähtsate teenuste ammendav

¹ VTATP 2017 = Valdkondliku teadus- ja arendustegevuse tugevdamise programmi (RITA) tegevuse 1 „Strateegilise TA tegevuse toetamine“ ülesanne „Tervikliku olukorrateadlikkuse võime loomine riigikaitseks“ 2017. 29. detsember, lk 12.

² *Ibid.*

³ **Hädaolukorra seadus.** – Riigi Teataja I, 17.05.2020, 3, § 2 lg 4. [**Hädaolukorra seadus**]

loetelu⁴. Elutähtsa teenuse osutaja võib olla eraettevõte, kohalik omavalitsus või riigiasutus.

Manticus Apollo projekti uurimisülesandes peetakse oluliseks ennekõike elutähtsate teenuste omavahelisi ristsõltuvusi. Nende analüüsil tuleb aga arvestada, et elutähtsate teenuste osutamine sõltub sageli ka teistest teenustest ja ressurssidest, mida saab teistelt ettevõtelt ja organisatsioonidelt. Kõige ilmsem sellise ressursi näide on tööjõud, kelle saadavus võib eri põhjustel ajutiselt väheneda. Samuti vajavad teenuseosutajad, et toorained neile tarnitud saaksid ja tootmine jätkuks. Riigi küberturvalisuse käsiraamatu järgi nimetatakse taristut, mis võimaldab elutähtsal teenusel toimida, kriitiliseks infrastruktuuriks⁵. Siinses artiklis analüüsimegi kriitilist infrastruktuuri mõjutada võivate sündmuste laiemaid tagajärgi ja nende tagajärgede edasikandumist Eesti kontekstis.

On ilmne, et kriitilise infrastruktuuri tööd pärssiva sündmuse võib olla põhjustanud katkestus või puudujääk vajaliku teenuse osutamises või vajaliku ressursiga varustamises. Ühelt teenuseosutajalt võib see puudus levida järgmisteni, nii et mingi teenuse osutamist jääb nõudlusest vähemaks. Samamoodi võib levida ka suurenenud nõudlus mingi teenuse järele: sel juhul võib suureneva nõudluse tulemusena ka eelmiste teenuste ja nende osutajate järele. Suurenenud nõudluse tulemusena on jällegi pakkumise vähesus võrreldes nõudlusega. Samuti võib see tekitada võistluse teenusetarbijate vahel. Laiapindne riigikaitse nõuab teadlikkust, kuidas vähenenud pakkumine või suurenenud nõudlus kaskadeerub: mõjutab sellega seotud teenuseid ning nende tarbijaid ja osutajaid, põhjustades seal omakorda mingite teenuste vähenenud pakkumist või suurenenud nõudlust, mille mõju on omakorda oluline teada.

Ristsõltuvuste väljaselgitamise uurimisülesandes oli esitatud soov, et teenuste omavahelised seosed oleksid kindlaks määratud ning seoste kirjeldus sisaldaks „teenuste omavaheliste mõjude ja ristsõltuvuste analüüsi“. Sooviti, et kirjeldustes esitatud sõltuvusi „[oleks] võimalik rakendada seoste ja sõltuvuse analüüsimiseks vajalike algoritmide väljatöötamiseks“.⁶ Need kirjeldused peaksid lahendama probleemi, mille puhul olemasolevate vahenditega ei ole võimalik ebasoovitavaid sündmusi ega nende arengut tõhusalt mudeldada ning puudub võimalus luua lihtsalt ja kiirelt ülevaateid

⁴ **Hädaolukorra seadus**, § 36.

⁵ **Luht, L.** 2020. Kriitiline infrastruktuur ja koostöö erasektoriga. – Maaten, E.; Vaks, T. (koost). Riigi küberturvalisuse käsiraamat. Tallinn: E-riigi Akadeemia, lk 35.

⁶ **VTATP** 2017, lk 12.

võimalikest ebasoovitavatest sündmustest ja nendega kaasnevast⁷. Seega oli siinses artiklis kirjeldatava töö eesmärk käsitleda teenuste ja ressursside vahelist sõltuvust viisil, mis toetaks ebasoovitavate sündmustega kaasneva olukorra ja selle arengu võimalikult täpset kirjeldamist. Sõltuvuste kirjeldamist ei ole siinkohal võimalik uurida eraldi analüüsialgoritmidest, sest meie töö eesmärk on, et need algoritmid aitaksid leida lahendusi tegelikkuses ette tulla võivates olukordades.

Koostöös Manticus Apollo projekti tellijatega (eelkõige Riigikantselei) tuvastasime, et ristsõltuvuste analüüsi ülesanne peidab endas tegelikult kahte üsna erinevat ülesannet. Neist esimene on nõrkade kohtade otsimine pakutavate ning tarbitavate teenuste ja ressursside võrgus. See vajab ülevaadet võrgust ja halbade juhtude määratlemist. Seejärel on võimalik uurida, kui palju (või vähe) tuleb muuta teenuste pakkumist ja nõudlust, et jõuda mõne halva juhuni. Teine ülesanne on jälgida osutatavate teenuste hetkeseisu ja prognoosida lähitulevikku, et teada, milliste teenustega võib lähiajal probleeme tekkida. See vajab peale teenusevõrgu ülevaate ka pidevalt uuenevat ülevaadet teenuste ja ressursside hetkeseisust. Selle hetkeseisu koondamine kohta, kus on võimalik teha lähitulevikku puudutavaid analüüse, on küllaltki keerukas arendusülesanne, mis nõuab andmevahetusstandardite ja töövoogude kokkuleppimist. Seejuures ei pruugi teenuste ja ressursside hetkeseis olla lihtsasti tuvastatav, vaid seda tuleb hinnata kaudsete näidikute abil.

Manticus Apollo projekti käigus oleme suutnud lahendada ennekõike esimest ülesannet, mis on suuresti teise ülesande alamosa. Meil on välja töötatud viisid kriitiliste infrastruktuuride modelleerimiseks, mudeli jaoks vajalike andmete kogumiseks, loodud mudelitel meid huvitava tulemuse arvutamiseks ja tulemuste valideerimiseks. Siinses artiklis tutvustatakse saadud tulemusi.

2. Lahenduse strateegia

Suures plaanis on elutähtsate teenuste ristsõltuvuste kirjeldamise strateegia lihtne: tuleb tuvastada nende teenuste osutamises olulised ressursid ja teised teenused, samuti nendevahelised otsesed, st ühesammulised sõltuvused. Need sõltuvused tuleb abstraherida ja formaliseerida viisil, mille tähendus on matemaatiliselts üheselt mõistetav. Samal viisil tuleb abstraherida ja formaliseerida sündmusi, mis võivad mõjutada teenuste osutamist, ning

⁷ VTATP 2017, lk 2–3.

olukordi, kuhu ei soovita sattuda. Saadud formaliseeringuid kui matemaatiliselt objekti saab uurida arvutiteaduse vahenditega.

Arvutiteaduse vahendite kasutamise eesmärk on leida formaliseerimise käigus loodavas mudelis nõrku kohti. Nende järgi saab tuvastada nõrgad kohad tegelikes teenustes, ressursides ja sündmustes. Nõrkus tähendab jõudmist ebasoovitavasse olukorda. Seejuures tuleb täpsustada, millistes stsenaariumides on sellesse olukorda jõudmine tõepoolest nõrkus. Halbade asjaolude kokkusattumisel ei pruugi me ebasoovitavasse olukorda sattumist nõrkuseks lugeda.

Abstraktsioon on alati midagi muud kui tegelik süsteem või keskkond. Abstraktsiooni kaudu ei pruugi me kõiki nõrkusi avastada, samuti võime leida nõrkusi, mida tegelikus süsteemis ei esine. Seega tuleb abstraktsioone ja nende abil saadud analüüsitulemusi valideerida. Samuti võiks abstraktsiooni-keeles olla võimalik väljendada ja analüüsides arvesse võtta ebakindlust mingite parameetrite väärtuste suhtes. Abstraktsioone ja formaalseid meetodeid saab kasutada nii füüsilisi⁸ kui ka inimkomponente⁹ sisaldavate süsteemide analüüsiks.

Üks võimalik arvutiteaduse vahend loodud formaliseeringute uurimiseks on matkemudelite kasutamine. Selleks tuleb koostada stsenaariumid – jada sündmustest, mis võivad mõjutada meid huvitavaid teenuseid. Need tuleb koostada lähtuvalt valdkonnateadmistest ning valida nii, et nende tulemusi mõjutaks tõenäolised nõrgad kohad teenusevõrgustikus, mida me avastada loodame. Stsenaariume koostatakse iteratiivselt, võttes arvesse varasemaid matkimistulemusi.

Teine võimalik arvutiteaduse vahend loodud formaliseeringute uurimiseks on mudelikontroll¹⁰. Ideaalis ei vaja see vahend stsenaariume, vaid otsib neid ise, lähtudes formaliseeritud mudelitest ja nõrkustest.

⁸ **Kammüller, F.; Probst, C. W.** 2017. Modeling and Verification of Insider Threats Using Logical Analysis. – IEEE Systems Journal, Vol. 11, No. 2, p. 537.

⁹ **Boender, J.; Ivanova, M. G.; Kammüller, F.; Primiero, G.** 2014. Modeling Human Behaviour with Higher Order Logic: Insider Threats. – 4th Workshop on Socio-Technical Aspects of Security and Trust, p. 34.

¹⁰ **Clarke, E. M.** 2008. The Birth of Model Checking. – Grumberg, O.; Veith, H. (eds). 25 Years of Model Checking: History, Achievements, Perspectives. Lecture Notes in Computer Science (Springer), Vol. 5000, p. 2.

3. Metamudel

Ressursside, teenuste ja sõltuvuste modelleerimiseks on tarvis metamudelit ehk keelt, milles väljendada nende olulisi omadusi. Artiklis on ülevaade asjakohastest modelleerimismudelitest, kus on esitatud sõltuvuste jaoks olulised parameetrid. Seejärel on antud hinnang, kuidas need parameetrid peaksid kajastuma meie modelleerimiskeeles, kui eesmärk on luua modelleerimis- ja analüüsimetodite suhtes agnostiline metamudel.

3.1. Metamudeli detailid

Sõltuvuste modelleerimiseks olulised detailid oleme jaotanud kolme kategooriasse: objektid, sõltuvused ja tagajärjed. Objektkategooria detailid käsitlevad mingi sündmuse mõjusid otse või teiste süsteemide kaudu kogeva süsteemi (sh seda süsteemi käitava organisatsiooni) erisusi. Sõltuvuskategooria detailid iseloomustavad kriitiliste infrastruktuuride vaheliste sõltuvuste omadusi. Kui me kasutaksime metamudeli alusesitusena graafi, iseloomustaksid objektkategooria detailid selle tippe ja sõltuvuskategooria detailid servi. Tagajärjekategooria detailid iseloomustavad mõju sündmuste sihiks olevale kriitilisele infrastruktuurile.

3.1.1. Objektkategooria detailid

Kriitilised infrastruktuurid on keerukad adaptiivsed süsteemid, mille osade dünaamilise vastastikmõju tulemusel tekib ilmnev käitumine¹¹. See on süsteemi käitumine viisil, mis ei ole tuletatav süsteemi osade käitumisest ega nende otsesest kombineerimisest¹². Detailid, mis keskenduvad süsteemide omadustele, mitte nende suhetele ja teiste süsteemidega läbikäimisele, kuuluvad objektkategooriasse.

¹¹ **Rinaldi, S. M.; Peerenboom, J. P.; Kelly, T. K.** 2001. Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. – IEEE Control Systems Magazine, Vol. 21, Issue 6, p. 13. [Rinaldi *et al.* 2001]

¹² **Manticus Apollo** 2020. Manticus Apollo terminiloend. Ülesanne 1.1. Terminoloogia (terminiloend). Versioon 1.0. Projekti teostajad Cybernetica AS, Tallinna Tehnikaülikool, Tartu Ülikool, Kaitseväe Akadeemia. Esitatud 7. septembril. **Motus, L.; Meriste, M.; Preden, J-S.; Pahtma, R.** 2012. Self-aware Architecture to Support Partial Control of Emergent Behavior. – Proceedings of the IEEE 7th International Conference on System of Systems Engineering. Genoa, Italy. July 16–19, pp. 422–427.

3.1.1.1. Skaala

Sõltuvuste analüüsi võib teha kahte tüüpi granulaarsusega (detailsusega), struktuurse või geograafilisega¹³. Struktuurse jaotamise korral keskendatakse süsteemi osadele, üksikutele üksustele, alamsüsteemidele, süsteemidele, infrastruktuurile või omavahel seotud infrastruktuuridele, sõltuvalt analüüsis kaetavate süsteemide suuruselt ja analüüsi katvusest. Näiteks võib aurugeneraatorit liigitada kui üksust, tuumaelektrijaama kui süsteemi ning infrastruktuur (elektri tootmiseks ja jaotamiseks) hõlmab mitut sama tüüpi süsteemi.

Geograafilise skaala määravad analüüsiobjektiks olevate süsteemide füüsilised piirid, mis võivad vastata linnade/valdade, regioonide ja riikide piiridele.

3.1.1.2. Sektori tüüp

Sõltuvusgraafi tipul võib olla olenevalt organisatsioonilisest keskkonnast mitu olulist detaili. Mõjutatavat süsteemi haldava organisatsiooni tegevussektor on üks element McDanielsi jt infrastruktuuririkete analüüsimudel¹⁴ ja meie jaotuses kuulub see objektkategooria detailide hulka. Detaile võib lisada veelgi, kui analüüsitavad organisatsioonid tegutsevad erinevatel juriidilistel ja regulatiivsetel alustel, mis võivad muuta sõltuvussuhteid.

3.1.1.3. Toimimistase

Matkemodelleerimisel on vaja kindlaks teha mingi tipu toimimine või mitte-toimimine. Toimimine võib olla ka kvantitatiivne suurus: süsteem või selle osa, mida tipp kujutab, võib olla suuteline toimima osalise jõudlusega. Kuna mudelid võivad kasvada üsna mahukaks, tuleb toimimist iseloomustada kõrge abstraktsustasemega. Tüüpiline sellise taseme näide on *toimimistase*, mis võib olla vastava tipu teenuse või tootmisvõime mõõt¹⁵.

¹³ Rinaldi *et al.* 2001, p. 21.

¹⁴ McDaniels, T.; Chang, S.; Peterson, K.; Mikawoz, J.; Reed, D. 2007. Empirical Framework for Characterizing Infrastructure Failure Interdependencies. – *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 13, Issue 3, p. 182. [McDaniels *et al.* 2007]

¹⁵ Panzieri, S.; Setola, R.; Ulivi, G. 2005. An approach to model complex interdependent infrastructures. – *IFAC Proceedings*, Vol. 38, Issue 1, p. 406. [Panzieri *et al.* 2005]

3.1.2. Sõltuvuskategooria detailid

3.1.2.1. Sõltuvuste tüübid

Kriitiliste infrastruktuuride vahelised sõltuvused jagunevad nelja põhitüüpi: (1) füüsiline, (2) info-, (3) geograafiline ja (4) loogiline sõltuvus¹⁶. Füüsilisi sõltuvusi iseloomustab materiaalne ressurss, mida kriitiliste infrastruktuuride vahel vahetatakse. Infosõltuvus on olemas siis, kui üks kriitiline infrastruktuur vajab toimimiseks teiselt informatsiooni. Ruumiline lähedus kriitiliste infrastruktuuride vahel kujutab endast geograafilist sõltuvust, mis väljendab seda, et mingi keskkonnasündmus võib kahjustada korruga mitut kriitilist infrastruktuuri. Erinevalt eelmistest ei tulene seda tüüpi sõltuvus kriitiliste infrastruktuuride vahelisest otsesest suhtlusest. Loogilist tüüpi sõltuvused tulenevad põhiliselt inimeste otsustest (nt seadusandlus, poliitika, ühiskondlikud probleemid).

Dudenhoeffer jt eristavad infosõltuvuste osana juhtimissõltuvusi¹⁷. Nende tavapärased näited on tööstusprotsessidest, mille oluline osa on superviisor-süsteemid. Kui sellise süsteemi töö muutub kehvemaks, põhjustab see probleeme haldamises ja seires. See ei pruugi kohe tööstusprotsessile mõju avaldada. Küll aga võib pahatahtlik ründaja, kes on suutnud saada süsteemile ligipääsu, kasutada seda sõltuvust protsessi segamiseks või manipuleerimiseks. Kui vahetatav informatsioon on selline, mida vastuvõttev protsess küll kasutab, aga mitte juhtimise või seire eesmärgil, siis on tegu info-, mitte juhtimissõltuvusega.

Dudenhoeffer jt käsitlevad ka poliitilisi-protseduurilisi ja ühiskondlikke sõltuvusi¹⁸, mis kujutavad endast loogiliste sõltuvuste¹⁹ alamtüüpe. Kui mingi tegutsemisviis või protseduur põhjustab ühes kriitilises infrastruktuuris sündmuse või olekumuutuse, mis omakorda mõjutab teist kriitilist infrastruktuuri, siis loetakse seda sõltuvuseks. Üks näide sellisest sõltuvusest on kogu kommertslenuliikluse mõnepäevane tühistamine Ameerika Ühendriikides pärast 11. septembri rünnakuid aastal 2001²⁰. Ka pärast lenuliikluse

¹⁶ Rinaldi *et al.* 2001, p. 12.

¹⁷ Dudenhoeffer, D. D.; Permann, M. R.; Manic, M. 2006. CIMS: A Framework for Infrastructure Interdependency Modeling and Analysis. – Perrone, L. F.; Lawson, B. G.; Liu, J.; Wieland, F. P.; Nicol, D. M.; Fujimoto, R. M. (eds.). Proceedings of the Winter Simulation Conference WSC 2006, p. 480. [Dudenhoeffer *et al.* 2006]

¹⁸ *Ibid.*, p. 481.

¹⁹ Rinaldi *et al.* 2001, p. 12.

²⁰ Dudenhoeffer *et al.* 2006, p. 481.

taastumist oli selle maht esialgu märksa väiksem kui enne rünnakuid, sest avalikkuse usaldus lennuliikluse vastu oli vähenenud. See on näide ühiskondlikust sõltuvusest.

Zhang ja Peeta nimetavad sõltuvustüüpidega ka eelarvelisi ning turu- ja majanduslikke sõltuvusi²¹. Eelarveline sõltuvus kujutab endast ressursside jagamise piiratust keskselt planeeritud majanduse puhul või õnnetusest taastumisel. Turu- ja majanduslikud sõltuvused on seotud jagatud ressurssidega samal turul või samas finantssüsteemis.

3.1.2.2. Sõltuvuste kriitilisus

Kriitiliste infrastruktuuride sõltuvussuhted võib jagada tugevateks ja nõrkadeks²². Tugev sõltuvussuhe tähendab, et häired ühe kriitilise infrastruktuuri töös levivad hõlpsalt teisele kriitilisele infrastruktuurile. Kahe kriitilise infrastruktuuri vahel puuduvad puhvrid, mis viivitaksid häire levikut. Nõrk sõltuvussuhe tähendab aga nõrgemat sidet kahe kriitilise infrastruktuuri vahel või suuremaid puhvreid.

Kriitilisust saab esitada arvuna, mis väljendab ühe süsteemi toimimistaseme sõltuvust teise süsteemi toimimistasemest. Garvey ja Pinto analüüsis iseloomustavad seda sõltuvust kaks arvu: sõltuvussuhte tugevus ja kriitilisus²³. Esimene neist kirjeldab positiivset korrelatsiooni kahe süsteemi toimimistasemete vahel ning teine iseloomustab kitsendusi, mida üks süsteem seab teisele.

3.1.2.3. Sõltuvuste komplekssus

Kriitiliste infrastruktuuride sõltuvussuhted saab nende nähtavuse ja ennustatavuse alusel jagada lineaarseteks ja kompleksseteks. Lineaarsed sõltuvussuhted on oodatud või planeeritud, nii et neid on piisavalt lihtne mõista ja uurida. Seevastu kompleksed sõltuvussuhted avalduvad pigem ebatavalistes olukordades ning on ootamatud ja keerulised tähele panna²⁴.

²¹ Zhang, P.; Peeta, S. 2011. A generalized modeling framework to analyze interdependencies among infrastructure systems. – *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 45, Issue 3, p. 554.

²² Rinaldi *et al.* 2001, p. 19.

²³ Garvey, P. R.; Pinto, C. A. 2009. Introduction to functional dependency network analysis. – *The MITRE Corporation and Old Dominion University, Second International Symposium on Engineering Systems*, Vol. 5. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology (MIT), p. 7.

²⁴ Rinaldi *et al.* 2001, p. 20.

3.1.2.4. Sõltuvuste eluiga

Sõltuvuste arvestatav kestus võib vastavalt süsteemi ulatusele ja vastas-mõjudele varieeruda millisekunditest aastateni²⁵.

3.1.2.5. Tagajärje edasikandumise viis

Tagajärje edasikandumise viisi alusel võib sõltuvussuhted jagada kaskaad-seteks, eskaleeruvateks ja põhjust jagavateks²⁶. Kaskaadne sõltuvussuhe märgib olukorda, kus häire ühe kriitilise infrastruktuuri töös põhjustab häire teise töös, sest esimene ei suuda teisele vajalikku sisendit anda. Eskaleeruv sõltuvussuhe on juhul, kui häire ühe kriitilise infrastruktuuri töös põhjustab häireid ja viivitusi teise töö taastumises mingist häirest, mis tekkis esimesest kriitilisest infrastruktuurist sõltumatult. Põhjust jagavad sõltuvussuhted kirjeldavad olukorda, kus mitme kriitilise infrastruktuuri töö on häiritud ühe ja sama sündmuse (nt maavärin, uputus või terrorirünnak) tõttu.

3.1.2.6. Sõltuvuste leidmise viisid

Infoallikatest, näiteks meediaaruannetest või ametlikest dokumentidest leitavad ajaloolised andmed õnnetuste ja katastroofide kohta võivad näidata tõrgete mustreid, millest võib tuletada sõltuvuste olemasolu ning nende võimalikke mõjutüüpe ja -tasemeid²⁷. Chang jt on kogunud järjekindlalt ajaloolisi andmeid, et luua andmebaas kriitiliste infrastruktuuride sõltuvustest, mis võivad avaldada ühiskondlikku mõju²⁸.

Teadmuse kogumine ekspertidelt (nt eksperdiintervjuud, töötoad või ümarlauaarutelud) on meetod, mida on kasutatud mitmes uuringus sõltuvuste tuvastamiseks²⁹. Paraku kipub eksperditeadmus viitama ainult lineaarsetele sõltuvussuhetele, panemata tähele kompleksseid sõltuvussuhteid.

²⁵ Rinaldi *et al.* 2001, p. 21.

²⁶ *Ibid.*, p. 22.

²⁷ Ouyang, M. 2014. Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems. – Reliability Engineering and System Safety, Vol. 121, p. 46.

²⁸ Chang, S. E.; McDaniels, T.; Beaubien, C. 2009. Societal impacts of infrastructure failure interdependencies: Building an empirical knowledge base. – Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Conference (TCLEE) 2009: Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment, pp. 1–10.

²⁹ Eusgeld, I.; Kröger, W. 2008. Comparative Evaluation of Modeling and Simulation Techniques for Interdependent Critical Infrastructures. Scientific Report, Laboratory for Safety Analysis. Zurich: ETH Zurich (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich), p. 3. [Eusgeld *et al.* 2008] Vt ka Luiijf, E. A. M.; Klaver, M. H. A. 2004. Protecting a Nation's Critical Infrastructure: The First Steps. – 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, p. 1186.

Kui kriitiliste infrastruktuuride käitumuslik mudel on leitud, võib matke-
modelleerimise abil olla võimalik leida kompleksseid sõltuvussuhteid, mis
tulenevad mitme süsteemi ilmnevast käitumisest³⁰.

3.1.3. Tagajärjekategooria detailid

Sellesse kategooriasse kuuluvad põhiliselt McDanielsi jt esitatud mudelist³¹
pärinevad detailid, mida saab kasutada mõju tagajärgede hindamiseks, kui see
on levinud sihtkohana toimiva kriitilise infrastruktuurini. Mõjuhinnangud
on vajalikud, et järjestada kriisiaegseid tegevusi tähtsuse järgi, kui piiratud
ressurse tuleb sihipäraselt kasutada. Tähtis on, et kuigi tagajärje edasi-
kandumise viis (vt p 3.1.2.5) võib olla oluline tagajärje mõistmiseks, ei nimeta
me seda viisi allpool, sest see on sõltuvust iseloomustav omadus (detail).

3.1.3.1. Tagajärje tüüp

Ühiskondlik tagajärg võib avalduda eri viisidel, näiteks inimese tervist või
ohutust mõjutavalt, majanduslikult, keskkondlikult või sotsiaalselt³².

3.1.3.2. Tagajärje ruumiline mõju

Geograafiline ala, mida sündmus on mõjutanud, on oluline teave sündmuse
mõjust arusaamisel. Selle detaili võimalikud väärtused võivad olla näiteks
„linn“, „regioon“, „riik“ või „rahvusvaheline“. Kriitilise infrastruktuuri
skaaladetailid (vt p 5) määravad, kus asub kriitiline infrastruktuur, mida
see sündmus otseselt mõjutab. Tagajärje ruumiline mõju näitab see-eest, kui
kaugemale võivad levida selle sündmuse kõikvõimalikud tagajärjed.

3.1.3.3. Tagajärje mõju elanikkonnale

Peale mõjutatava ala suuruse on ka selle ala elanike arv üks põhiparameetreid
tagajärgede hindamisel. Selle parameetri võimalike väärtuste hulga võib
valida tehtava analüüsi konteksti alusel (nt „1000, 10 000, 100 000“).

³⁰ Panzieri *et al.* 2005, p. 408.

³¹ McDaniels *et al.* 2007, p. 177.

³² *Ibid.*, p. 179.

3.1.3.4. Tagajärje kestus

See detail iseloomustab sündmuse mõju kestust. Võimalik väärtus võib olla minutites, tundides, päevades või nädalates. Sõltuvuse eluiga (vt p 3.1.2.4) erineb tagajärje kestusest, sest tagajärg võib olla tuntav veel siis, kui sündmuse tekitanud sõltuvust enam ei ole.

Tsuruta jt analüüsisid võimaliku maavärina tagajärje kolmes etapis: vahe-
tult pärast sündmust, kriisi lahendamise ajal ja taastetööde ajal³³. Nad leidsid, et teed, raudteed ja sidesüsteemid on seejuures kõige olulisemad kriitilised infrastruktuurid, millest sõltutakse kriisi lahendamisel ja taastetöödel.

3.1.3.5. Tagajärje tõsidus

Tagajärje tõsidus on vahend hindamistulemuste järjestamiseks. Tõsidust iseloomustavad kirjeldused (nt väike, keskmine, suur) võib luua eespool esitatud detailide väärtuste kombinatsioonidena. McDaniels jt kasutavad tagajärje tõsidust selleks, et iseloomustada sündmusest taastumiseks vajalikku pingutust³⁴. Nende määratluses on tagajärje üldhinnang nelja väärtuse – tagajärje ruumiline mõju, mõju elanikkonnale, kestus ja tõsidus – kaalutud keskmine.

3.1.3.6. Tagajärge põhjustava sündmuse tüüp

Esialgne sündmus, mis põhjustab tagajärje, jaguneb õnnetuseks, ründeks või rikkeks³⁵. Õnnetusena mõistame juhuslikult toimuvaid sündmusi, nagu loodusõnnetused, kus sündmuse algpõhjus ei ole kriitiline infrastruktuur ise. Ründed on pahatahtlikud tegevused kriitiliste infrastruktuuride vastu, mille saadavad korda või vähemalt algatavad inimtoimijad, kasutades füüsilisi või infotehnoloogiavahendeid või nende kombinatsioone. Rikkeid, erinevalt eelmistest kategooriatest, põhjustavad süsteemi enda või selle alam-süsteemi vead.

3.2. Valikud

Manticus Apollo projektis on enamik uuritavaid organisatsioone avalikust sektorist, kuigi elutähtsa teenuse osutajad on küllalt tihti eraettevõtted. Seega on meile olulised avaliku sektori sõltuvused: poliitilised-protseduurilised,

³³ Tsuruta, M.; Goto, Y.; Shoji, Y.; Kataoka, S. 2008. Damage propagation caused by interdependency among critical infrastructures. – The 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, China. October 12–17, p. 7.

³⁴ McDaniels *et al.* 2007, p. 179.

³⁵ Eusgeld *et al.* 2008, p. 4.

ühiskondlikud, eelarvelised ning turu- ja majanduslikud sõltuvused mängivad füüsiliste, informatsiooniliste ja geograafiliste sõltuvuste kõrval tagajärgede edasikandumises olulist rolli.

Ehkki olulised sõltuvused võivad olla väga erinevat tüüpi, kujutavad need endast mõju edasikandumist üsna sarnast tüüpi detailide vahel. Üldjuhul on need toimimistaset väljendavad detailid, mille võimalikud väärtused on kas tõeväärtused (kui mingi ressurss või teenus toimib või mitte) või (reaal)-arvud mingist vahemikust (kui toimimistaset on mõistlik väljendada arvuliselt). Need toimimistasemed võivad olla paigutatud mingi suurema andmestruktuuri tippudesse, mis vastavad keerulisema ressursi või teenuse osadele (vastavalt skaalale, milles sõltuvuste analüüsi teeme). Mingis stsenaariumis neile toimimistasemetele omistatud väärtused muutuvad vastavalt stsenaariumi sündmustele ja tagajärgede levikule sõltuvusüleselt.

Näeme seega, et aeg on sõltuvusi modelleerides oluline kategooria. Toimimistaseme väärtust tuleb käsitada ajahetke funktsioonina. Olgu ajahetkede hulk T . Olenevalt kasutatavatest analüüsimeetoditest võib T olla kas reaalarvude hulk R või täisarvude hulk Z . Esimene neist vastab pidevalt kulgevale ajale, teise puhul on aeg diskreetne ja on võimalik rääkida mingile ajahetkele järgnevast hetkest.

Teine oluline kategooria võiks olla modelleeritavate süsteemide ruumilised ja geograafilised aspektid. Need on väga heterogeensed, erinedes sedasi olulisel määral ajalise kategooriast. Ühe süsteemi puhul võib oluline olla geograafiline aspekt, mõnel teisel aga komponentidevahelised loogilised ühendused. Seega oleme otsustanud, et erinevalt ajast me ruumiaspekti oma metamudelil ühtsel viisil ei kajasta. Kui tekib vajadus arvestada mingi detaili toimimistaseme väärtust eri ruumipunktides, on iga olulise ruumipunkti jaoks olemas eraldi detail, mille toimimistaseme väärtusega arvestatakse. Iga üksikväärtus (kindlal ajahetkel) on aga lihtne, nagu ülalpool mainitud – kas tõeväärtus või arv.

Meie metamudel peab andma viisi, kuidas kirjeldada sõltuvusi toimimistasemete väärtuste vahel. See viis peab võimaldama väljendada suurte kadudeta sõltuvuskategooria detaile, ent olema siiski piisavalt lihtne, et analüüs oleks hõlpsasti tehtav. Sõltuvuste kirjapanekul peab kindlasti olema võimalik kirjeldada tagajärgede levimise aega. Meie mõistes on tükiti lineaarsed funktsioonid piisavalt lihtsad matkimiseks ja väikeste mudelite mudelikontrolliks, kuid samal ajal piisavalt väljendusrikkad. Teised funktsioonid võiksid olla nende kaudu lähendatavad. Tükiti lineaarsust nõuame nii toimimistaseme väärtustelt (kui ajahetkede funktsioonidelt) kui ka väärtustevahelistelt sõltuvustelt.

Allpool kirjeldame kahte metamudelit, mida oleme kasutanud Manticus Apollo projektis ja millest võib olla kasu elutähtsate teenuste vaheliste oluliste sõltuvuste avastamisel. Kuigi punktis 2 on toodud arutelu parameetrite väärtuste kohta käiva ebakindluse kirjeldamise kasulikkusest, esitavad mõlemad metamudelid deterministliku kirjelduskeele. Me ei ole veel loonud ega analüüsinud piisavalt palju ja keerukaid mudeleid ebakindluse kirjeldamiseks.

3.3. Esimene metamudel

Meie esimene metamudel keskendus üksikute toimimistasemetega väärtustele. Selles metamudelis kirja pandud mudelites tuli nimetada kõik väärtused, mille vahelisi seoseid metamudelis kirjeldati. Väärtused vastasid nii uuritava süsteemi kui ka uuritava stsenaariumi detailidele. Kui need väärtused olid nimetatud, koosnes mudel võrrandite hulgast, kus igaüks neist väitis, et üks nimetatud väärtustest on võrdne mingi avaldisega teistest väärtustest. Iga väärtuse jaoks, mis vastas uuritava süsteemi mingile detailile, pidi olema täpselt üks võrrand, kus see väärtus oli pandud võrduma mingi avaldisega. Kui mudeli uurimiseks oli kavas kasutada matkimist, pidi ka iga uuritava stsenaariumi detailile vastava väärtuse jaoks olema üks samasugune võrrand. See võrrand seadis selle väärtuse võrdseks mingi „konstantse“ avaldisega, kus konstantsus tähendab sõltumatust teiste detailide väärtustest, mitte konstantsust ajas.

Avaldiste jaoks kasutatav keel lubas väljendada tükiti lineaarseid sõltuvusi, näiteks lineaarseid kombinatsioone mingitest väärtustest, nende kombinatsioonide võrdlemisi ja neid kasutavaid tingimusavaldisi. Samuti olid keeles olemas ajalised operatsioonid: viivitused, ekstreemumi võtmine ja integreerimine üle mingi ajavahemiku. Neile kehtisid teatud piirangud, mis hoolitsesid selle eest, et kõigi avaldiste väärtused oleksid endiselt tükiti lineaarsed. Näiteks sai integreerida ainult tõeväärtuslikke, mitte arvulisi väärtusi.

Toome ühe näite lihtsa süsteemi modelleerimise kohta. Olgu meie süsteem toimiv, kui see on varustatud elektriga. Elektrivarustus võib toimuda elektrivõrgu kaudu või kohaliku generaatori abil. Kohalik generaator vajab toimimiseks kütust, generaatori paagi mahust jätkub kütust λ tunniks. Kütust on võimalik juurde tuua tanklast, kus on piisavalt suur kütusevaru. Kütuse järele minnakse siis, kui paaki jäänud kütusest piisaks ϕ tunniks. Järelkäimine võtab aega ρ tundi ja selle aja jooksul peavad teed olema läbitavad. Meie süsteemi kirjeldusel on seega kaks (välist) sisendparameetrit. Parameeter e , mille võimalikud väärtused on tõeväärtused „tõene“ ja „väär“, kirjeldab, kas elektrivõrgu kaudu varustamine toimib. Parameeter t , mille

võimalikud väärtused on samuti tõeväärtused, kirjeldab, kas teed on läbitavad. Meid huvitab, kas süsteem parasjagu töötab. Tähistagu seda muutuja T , mille võimalikud väärtused on samuti tõeväärtused. Oluline on, et kõik parameetrid on funktsioonid ajahetkedest, st igal ajahetkel on neil mingi väärtus ja eri ajahetkedel võivad olla erinevad väärtused. Me soovime leida muutuja T väärtusi igal ajahetkel, kui meile on antud muutujate e ja t väärtused igal ajahetkel.

Süsteemi oluline sisemine parameeter on kütusevaru v generaatori paagis. Loeme, et v võimalikud väärtused kuuluvad lõiku 0-st (tühi paak) kuni λ -ni (täis paak). Jällegi, v on ajahetke funktsioon. Juba nimetatud parameetrid on seotud järgmiselt:

$$T = e \vee [v > 0].$$

Tähtis on, et ajahetki ei pea siin ilmutatult nimetama, see seos kehtib kõigil ajahetkedel.

Kütuse juurdevedu modelleerime parameetriga d , mis on tõene neil hetkedel, kui saabub kütuselaadung. Parameeter d on seega samuti tõeväärtuslik, kuid ta erineb parameetritest e , t ja T selle poolest, et ta on tõene ainult diskreetsel hulgal. Kütuselaadungi saabumist kirjeldab järgmine valem.

$$d = \uparrow([\text{delay}_\rho(v) \leq \varphi] \& [\text{int}_\rho(t) \geq \rho])$$

Selles valemis on \uparrow -operaatori all oleval tõeväärtuslikul avaldisel kaks poolt. Esimene neist kirjeldab piisavat põhjust ρ tundi tagasi kütuseauto välja saata. Teises pooles olev alamavaldis $\text{int}_\rho(t)$ annab meile ajavahemiku või nende summa, millal on viimase ρ tunni jooksul olnud teed läbitavad. Me nõuame, et see oleks vähemalt ρ , st teed on selle aja jooksul olnud pidevalt läbitavad. Me ei modelleeri siinkohal, mis juhtub siis, kui auto on juba välja saadetud, aga tee muutub läbimatuks. Lõpuks, \uparrow -operaator, rakendatuna tõeväärtusavaldisele, annab meile ainult need ajahetked, kus see avaldis muutus väärast tõeseks.

Kütusevaru, selle juurdevedu ja generaatori töö on samuti omavahel seotud. Seda väljendab alljärgnev valem.

$$v = \max\{0, \lambda - \text{int}_d(\neg e)\}$$

See tähendab, et kütusevaru ei ole kunagi negatiivne. Alamavaldis $\text{int}_d(\neg e)$ annab meile ajavahemiku (või ajavahemike summa), millal on pärast viimatist kütuse juurdevedu elektrivarustus puudunud.

Kui on olemas niisugune süsteemi kirjeldus ja sisendparameetrite väärtused iga ajahetke kohta, on võimalik leida väljundparameetri väärtused igal ajahetkel. Piisava analüüsivõime korral suudaksime uurida näiteks, milline on φ sobivaim väärtus, mis minimeeriks süsteemi tööshoidmise keskmisi kulusid, kui meil on teada kitsendused e ja t võimalike väärtuste kohta (piiratud on, kui sagedasti ja kui pikaks ajaks võib nende väärtuseks olla „väär“) ning süsteemi mittetöötamisele ja kütuse juurdeveole on omistatud hind.

Meie esimene metamudel oli seega üldine, võimaldades ühtmoodi hästi (või halvasti) mudeldada kõiki ajas arenevaid süsteeme. Selle avaldiste keeles oli mugav kirja panna sõltuvusi, mis olid mudeldamise aluseks olnud dokumentides kirjas, kuid kohmakam kirjeldada neid sõltuvusi, mida ei olnud kirjas. Metamudeli väljendusvõimsus sarnaneb DMCI mudeli³⁶ ja selle edasiarendusega³⁷, kuid meie kasutatav formaliseering on märksa kergem. Metamudeli detailid on esitatud lisa 1.

3.4. Teine metamudel

Pärast esimese metamudeli väljapakumist, matkevahendi (kirjeldatud allpool) koostamist ja mõne elutähtsa teenuse osutaja modelleerimist jõudsime olukorda, kus leidsime, et ühtepidi on meie vahendid küll väga võimsad ja väljendusrikkad, kuid teistpidi on nendega keeruline modelleerida olulisi aspekte, mida oli intervjuudes nimetanud mitu valdkonnaeksperti. Luues vahendeid ja kogudes andmeid, on meie eesmärk olnud vastata küsimusele „kui midagi juhtub, siis mis veel juhtub?“. Meie loodud vahendid ja mudelid sobisid väga hästi sellele küsimusele vastamiseks, kui „midagi“, mis juhtub, on mingi sisendi – teenuse või ressursi – katkestus, lõppemine või kvaliteedi vähenemine. Meie matkesüsteem suudab seda katkestust või kvaliteedi vähenemist mudelit pidi edasi kanda ning leida, mis ja millal veel lõppeb või väheneb.

Juhtuda võib „midagi“ ei pruugi aga olla mingi sisendi lõppemine või vähenemine. See võib olla ka mingi väljundi nõudluse kasv. Lihtne on näiteks kujutada ette olukordi, kus kasvab nõudlus vältimatu abi järele või muutub

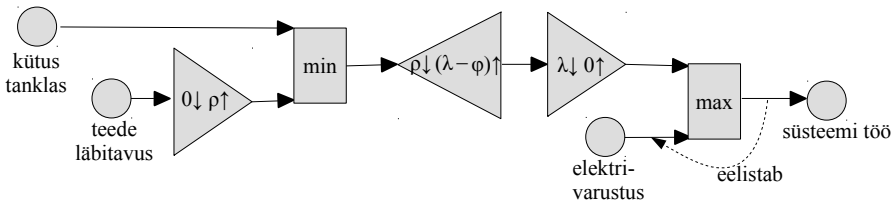
³⁶ **Trucco, P.; Cagno, E.; De Ambroggi, M.** 2012. Dynamic functional modelling of vulnerability and interoperability of Critical Infrastructures. – Reliability Engineering and System Safety, Vol. 105, p. 53.

³⁷ **Galbusera, L.; Trucco, P.; Giannopoulos, G.** 2020. Modeling interdependencies in multi-sectoral critical infrastructure systems: Evolving the DMCI approach. – Reliability Engineering and System Safety, Vol. 203, Article No. 107072, p. 3.

tunduvalt ressursinõudlikumaks teede sõidetavuse tagamine. Kui teenuse nõudlus kasvab, siis kasvab nõudlus ka selle teenuse sisendite järele ja see nõudlus võib levida kaugemale. Nõudluse kasvu levimist on meie mudelite aluseks olnud dokumentidest märksa raskem tuletada kui pakkumise vähenemise levimist. Samuti ei selgu neist dokumentidest, kuidas tehakse otsuseid, kui on valida, millist sisendina kasutatavat ressursi tarbida, või kui peab valima, millist nõudlust rahuldada ja millist mitte. Tõenäoliselt on enamikul juhtudel otsustada lihtne ja leidub parim viis, kuidas valikut teha. Matkimiseks peab see otsustusviis olema fikseeritud. Meie esimeses metamudelis saab seda väljendada, aga see on kohmakas. Meie eesmärk on fikseerida, et otsustuskohtades otsustatakse üldiselt vaikimisi, välja arvatud siis, kui selle koha jaoks on fikseeritud otsustusviis.

Teine kirjeldatav metamudel defineerib graafidel põhineva keele, mis on valdkonnaspetsiifilisem ja räägib konkreetsetest kohtadest, kus ressursse või teenuseid luuakse, tarbitakse, nõutakse ja nõudlust rahuldatakse. Otsustuskohad ja infovood on selgesti esitatud, samuti on välja toodud nõudluse ja pakkumise omavaheline dünaamika. Nõudlus ja pakkumine on tihedasti seotud: ühe suurenedes või teise vähenedes jaotub teine ümber.

Teise metamudeli kaudu saab väljendada, millistes kohtades mingeid teenuseid osutatakse või ressursse luuakse ja kes neid tarbib, arvestades puhvreid, mis on teenuse tarbijal lühiajaliste katkestuste puhuks juba olemas. Selles ei ole nii mugav kirjeldada perioodilisi tegevusi, nagu esimese metamudeli puhul näitena toodud kütuse juurdevedu. See ei ole olnud ka eesmärk. Suurt osa sellest näitest on võimalik siiski esitada ka teises metamudelis, seda väljendab graaf joonisel 1.



Joonis 1. Teisele metamudelile vastav lihtne joonis

Joonisel on ringidena kujutatud sisend- ja väljundtipud, ristkülikutena ressursside või teenuste kombineerimise tipud ning kolmnurkadena pakkumise (tipuga paremal) ja nõudluse (tipuga vasakul) viivitamise tipud. Ristkülikute sees olev operatsiooninimi näitab, kuidas pakkumisi kombineerida: miinimumi võtmine tähendab, et teenuse või ressursi pakkumiseks on vaja

mõlemat sisendit, maksimumi võtmine, et piisab ühest sisendist. Võimalikud on ka teistsugused kombineerimised, näiteks liitmine. Kombineerimistippude juures on võimalik väljendada, millist sisendit soovitakse ennekõike kasutada: kui elektrivarustuse pakkumine on olemas, puudub ülemisel sisendil nõudlus.

Huvitavaim osa sellest mudelist on viivitamistipud. Iga viivitamistipuga on seotud kaks arvu – ajavahemiku pikkust –, mis näitavad, kui pika viivitusega pakkumise kahanemine või kasvamine tipu sisendis (või nõudluse kahanemine või kasvamine tipu väljundis) kajastub selle tipu väljundis (nõudluse korral sisendis). Parempoolne pakkumise viivitamise tipp väljendab, et kütuse juurdeveo katkemisel jätkub seda veel λ tunniks, seejuures juurdeveo taastumisel on kütus kohe olemas. Nõudluse viivitamise tipp väljendab, et kütuse järele nõudluse tekkimine kajastub juurdeveo vajaduses alles $\lambda - \varphi$ tunni pärast. Ent kui juurdevedu on vaja, siis on seda vaja hiljemalt ρ tunni jooksul. Vasakpoolne pakkumise viivitamise tipp väljendab, et juurdeveoks peavad teed olema läbitavad ρ tunni jooksul.

Loodud mudelil saab läbi mängida stsenaariume. Stsenaariumis antakse ette sisenditippude pakkumise ja väljunditippude nõudluse muutused ajas. Samuti võib stsenaarium ette näha keerulisemaid sõltuvusi sisend- ja väljunditippude nõudluste ja pakkumiste vahel, näiteks tööjõu väsimist ja sellega seotud vähenemist pakkumises, kui selle järele on pikka aega olnud suur nõudlus.

Defineeritud keel võimaldab väljendada suhteliselt lihtsasti keerulisemaid asju ja arutleda nende üle matke abil. Esimene neist on võistlemine ressursside nimel. Me saame väljendada, et tööjõud või erimasinad ei ole kõigile kättesaadavad, kui kõik neid vajavad. Teine keerulisematest asjadest, mille üle suudame arutleda, on otsustus- ja infovahetuskiirus ressursside küsimisel ja kasutusele võtmisel. Meie keel võimaldab ka modelleerida, kuidas paraneb pakkumise ja nõudluse muutustele reageerimine, kui informeerida toimijat varakult ressursi peatsest lõppemisest, nii et ressursi lõppemise ajaks on asendusressurss küsitud.

Teise metamudeli detailid on toodud lisas 2.

4. Modelleerimine

Kui metamudel ehk teenuste- ja ressurssidevaheliste sõltuvuste kirjapaneku keel on defineeritud, tuleb järgmisena leida tegelikud sõltuvused ja need selles keeles kirja panna. Oleme uurinud paari erineva võimaliku allika

kasutamist sõltuvuste leidmiseks. Neist esimest oleme kasutanud koos esimese metamudeliga, teist koos teisega.

4.1. Allikas 1: elutähtsa teenuse osutajate riskianalüüsid

Hädaolukorra seaduse järgi peab elutähtsa teenuse osutaja koostama selle teenuse riskianalüüsi ja taasteplaani, et teenus oleks toimepidev ning oleks võimalik hinnata riske ja taastada toimepidevust³⁸. Riskianalüüsi nõuded kehtestab kriisiohje koordineerimise eest vastutav minister määrusega³⁹. Selles määruses on esitatud skeem, kuidas elutähtsa teenuse osutaja peab pidama arvet oma teenuste osutamist mõjutavate teenuste ja ressursside üle, samuti mõju avaldumisviiside üle.

Määruses on nähtud elutähtsa teenuse osutamiseks ette *kriitilised tegevused*, mis tuleb nimetada elutähtsa teenuse osutajal⁴⁰. Iga kriitilise tegevuse puhul peab hindama, kui oluline on see teenuse osutamisel. Hinnata tuleb, kui kaua saab teenust häireteta osutada tegevuse katkemisel ja kui ulatuslik on teenusekatkestus tegevuse katkemisel.

Määruses on ette nähtud seegi, et iga kriitilise tegevuse osutamiseks on olulised *ressursid*, mille seost teenuse osutamise ja elutähtsa teenuse osutaja kirjeldama. Ressursiks võib olla ka sisseostetav teenus. Iga ressursi ja tegevuse jaoks tuleb hinnata, kui oluline on see ressurss tegevuse täideviimisel: kui kaua saab hakkama ilma selleta ja millised on võimalikud asendusressursid.

Seega peavad elutähtsa teenuse osutajate riskianalüüsid sisaldama objektikategooria detaile (teenused, tegevused, ressursid), millele vastavaid toimimistasemeid ja nende muutumist ajas on võimalik kirjeldada meie metamudelil. Riskianalüüsis on kirjeldatud ka toimimistasemete vahelisi sõltuvusi. Ühe teenuseosutaja teenus võib olla teise teenuseosutaja kasutatav ressurss. Sedasi tekivad teenuseosutajate vahel seosed, mis aitavad tuvastada mõju levimist ühelt teenuselt teisele.

Oleme saanud ligipääsu mõne elutähtsa teenuse osutaja (Tallinna linn, Põhja-Eesti Regionaalhaigla, SK ID Solutions, AS Elering) riskianalüüsile ja koostanud nende alusel mudelid. Oleme näinud, et riskianalüüsides kvaliteet erineb. Osa riskianalüüsi kirjeldab tegelikku olukorda olemasolevate

³⁸ Hädaolukorra seadus, § 39 lg 1.

³⁹ *Ibid.*, § 39 lg 5.

⁴⁰ ETTRP = Elutähtsa teenuse toimepidevuse riskianalüüsi ja plaani, nende koostamise ning plaani kasutuselevõtmise nõuded ja kord. – Riigi Teataja I, 28.06.2017, 6, § 7 lg 1.

ressursside alusel, teised pigem formaalseid nõudmisi teenuste osutamiseks vajalike ressursside kohta. Mõjuvaid puudusi, mis takistavad formaliseerimist, on geograafilise skaala katmisel. Riskianalüüsides ei selgu, millist granulaarsust (detailsust) tuleks kasutada eri ruumpunktides teenuste osutamisel ja tarbimisel.

Formaliseerimisele järgnenud intervjuudes elutähtsa teenuse osutajate esindajatega selgus ka, et sisendressursse ei ole neis riskianalüüsides kirjeldatud piisava täpsusega selleks, et oleks võimalik usaldada matkimistulemusi, kui uuritakse stsenaariume, mis väljendavad nende ressursside osalist kadu või nõudluse suurt kasvu. Tuli välja, et kõikvõimalikke tavatuid asendusi, mida võib vajadusel kasutada, ei ole riskianalüüsides kajastatud. Teisalt tuli ka välja, et nii mõnigi ressurss, nt teatud oskustega töäjõud, huvitab kriisiolukorras mitut selle ressursi pärast võistlevat elutähtsa teenuse osutajat.

Eelnimetatud määruse järgi tuleb teenuste osutamise ja tegevuste toimumistaset hinnata kvantitatiivselt. Riskianalüüsides kajastavad, kuidas need toimumistasemed muutuvad, kui juhtub midagi ühega nende sisenditest. Need ei kajasta aga seda, milline on muutus siis, kui korraga juhtub midagi mitme sisendiga. Mudeleid koostades oleme üritanud kombineerida sisendite toimumistasemete muutuste mõjusid oma äranägemist mööda (nt mõnes kohas need mõjud kokku liites, ent mõnes teises kohas arvestades ainult maksimaalset mõju), kuid õige valik riskianalüüsi dokumendist ei selgu.

4.2. Allikas 2: analüütiku töövahend

Pärast tuvastamist, et elutähtsa teenuse osutajate riskianalüüsides on siiski puudu analüüsi jaoks tähtsad detailid, eriti nõudluse modelleerimises, leidsime, et otse valdkonnaspetsialisti käest küsimine võiks aidata teha kindlaks olulised ressursid ja sõltuvused. Küsida tuleb aga nii, et valdkonnaspetsialist oskaks vastata. Sõltuvusi ei tohiks paluda kirjeldada otse modelleerimiskeeles. Vaja läheb graafilist töövahendit, mille abil kirjeldada organisatsiooni sisendeid ja väljundeid. See graafiline vahend ei pruugi anda ega peagi andma ligipääsu metamudeli kogu väljendusvõimsusele, vaid peaks lubama kirjeldada sõltuvusi valdkonnaspetsialistile arusaadaval viisil. Töövahendi arendus peaks käima ühel ajal sõltuvuste kirjeldamisega, nii et väljendusvajaduste lisandumisel saaks need vahendile lisada.

Praegu luuakse sellist töövahendit ja valideeritakse selle funktsionaalsust koostöös Riigikantselei analüütikuga. Töövahend lubab analüütikul esitada üksikasjalikult teenuseosutaja sisendid ja väljundid ning kirjeldada, kuidas väljundite pakkumine sõltub sisenditest. Seejuures saab näidata, kui kaua

on võimalik tulla toime ilma selle sisendita ning millised on võimalikud asendussisendid. Eri teenuseosutajate sisendeid ja väljundeid saab omavahel siduda, näidates sellega, et ühe teenuseosutaja väljund on järgmise sisend.

Sisendite ja väljunditega on võimalik siduda sündmusi, mis kujutavad endast vastava ressursi pakkumise vähenemist või nõudluse kasvu. Neid sündmusi on ajavahele asetades võimalik kombineerida stsenaariumideks.

5. Stsenaariumid ja valideerimine

Loodud mudelite abil on võimalik teha arvutusi ja analüüse. Meie põhiliseks analüüsimeetodiks on osutunud matkemodelleerimine. Oleme koostanud selle jaoks stsenaariumi, mille sündmused juhtuvad teatud ajal. Mudelisse lisame nende sündmuste mõju nende toimumisajal. Seejärel leiame matkevahendi abil, kuidas muutuvad ajas teised mudelis kirjeldatud väärtused.

5.1. Arvutamine

Mõlema metamudeli jaoks on meil loodud matkevahend, mis võtab ette mudeli kirjelduse ja arvutab välja selles kirjeldatud väärtused igal ajahetkel. Esimene matkevahend on eraldiseisev rakendus (mudel tuleb talle ette anda programmeerimiskeeles). Teine matkevahend on integreeritud analüütiku töövahendiga.

Esimese metamudeli loomisel arvestasime, et mudelikontrolli vahendeid saaks kasutada selles keeles kirja pandud mudelite analüüsil. Ennekõike pidasime silmas lineaarseid hübriidautomaate analüüsivaid vahendeid⁴¹. Paraku tuleb tõdeda, et meie mudelite põhjal moodustatavad automaadid on nende vahendite kasutamiseks liiga suured⁴².

5.2. Veaallikad

Matkevahendi abil on võimalik leida, kuidas meid huvitavad (mudelis kajastatud) väärtused ajas muutuvad. Meile on oluline, et välja arvutatud väärtused oleksid samad või sarnased objektide eri detailide väärtustega, mis võivad

⁴¹ **Henzinger, T. A.** 1996. The Theory of Hybrid Automata. – Proceedings 11th Annual IEEE Symposium on Logic in Computer Science, p. 278.

⁴² **Damm, W.; Dierks, H.; Disch, S.; Hagemann, W.; Pigorsch, F.; Scholl, C.; Waldmann, U.; Wirtz, B.** 2012. Exact and fully symbolic verification of linear hybrid automata with large discrete state spaces. – Science of Computer Programming, Vol. 77, Issues 10–11, p. 1142.

ette tulla tegelikus elus samasuguse stsenaariumi korral. On mitu põhjust, miks need võivad olla erinevad. Esitame ülevaate olulisimatest põhjustest.

Kehv formaliseering. Esimene võimalik põhjus on, et meie loodud formaalkeel ei suuda esitada sõltuvusi piisavalt täpselt. Meie formaalkeel on loodud niimoodi, et arvuliste parameetrite sõltuvus ajast on tükati lineaarne. Sellise kitsenduse tegime selle pärast, et arvutamised ja analüüsid oleksid lihtsamad. Võib juhtuda, et formaliseerimispiirangud ei luba esitada otseseid sõltuvusi piisavalt täpselt. Tuleb tähele panna, et elutähtsa teenuse toimepidevuse riskianalüüsid on ette nähtud⁴³ esitada sõltuvustena ressurs-tegevus-teenus, kus teenuse toimimine võib omakorda olla mõnele teisele elutähtsa teenuse osutajale vajalik ressurss. Ressursi puudumisel võib olla tegevuse toimumisele erineva suurusega, erineval määral ajatatud mõju. Tegevuse mittetoimumine võib aja möödudes vähendada teenuse osutamise määra. Meie väljapakutud formaliseering suudab selliseid ajalisi aspekte täpselt kirjeldada. Kvantitatiivsete aspektide kodeerimiseks pakuvad meie metamodelid välja mitu võimalust ja ükski neist ei ole otseselt teistest parem.

Kehvad riskianalüüsid. Erinevate elutähtsa teenuse osutajate koostatud riskianalüüsid on eri kvaliteediga. Eespool viidatud siseministri määruses fikseeritud sõltuvuste esitamise viis ei pruugi igale elutähtsa teenuse osutajale sobida või on talle harjumatu. Samuti selgub projekti käigus tehtud intervjuudest, et riskianalüüside koostajad ei kujuta ette, mida selles analüüsis tuleks esitada või kuidas analüüsi kasutada.

Halb kodeering. Manticus Apollo projekti käigus oleme tutvunud riskianalüüsidega ning formaliseerinud neis toodud sõltuvusi meie sõltuvustekees. Kaugemas tulevikus võiksid elutähtsate teenuste osutajate esindajad (valdkonnaspetsialistid) neid formaliseerimisi ise teha. Üks võimalikke veallikaid on see, et me ei ole riskianalüüsis väljendatud sõltuvustest õigesti aru saanud. Sel juhul ei väljenda meie kirjapandud valemid neidsamu sõltuvusi, mida valdkonnaspetsialist silmas pidas.

Valesti tehtud arvutused. Alapunktis 5.1 kirjeldame arvutusi, mida me teeme otseste sõltuvuste omavahel kombineerimiseks ja kaudsete sõltuvuste tuletamiseks. Need on mittetriviaalsed arvutused, seega on võimalik, et me oleme teinud nende programmeerimisel vigu. Neid vigu on võimalik küll avastada põhjalikuma testimisega, seega ei ole need nii tõsised kui eelmistes lõikudes kirjeldatud vead.

⁴³ ETTRP, § 7–8.

5.3. Valideerimisviisid

Lisaks tarkvara korralikule testimisele on veel võimalikke valideerimisviise, mille abil kontrollida, kas oleme suutnud läbida vigadeta järgmise ahela sammud:

- tegelikud sõltuvused teenuste vahel;
- valdkonnaspetsialistide teadmised;
- määrusepärased riskianalüüsid;
- formaliseeritud riskianalüüsid;
- arvutatud sõltuvused.

Anname neist siinkohal ülevaate, mõistes, et tegelikult taanduvad kõik viisid ikkagi eksperdihinnangutele.

Ekspertdihinnangud. Olles kaudsed sõltuvused välja arvutanud, saab neid tutvustada valdkonnaspetsialistidele. Nende hinnang leitud või leidmata sõltuvuste mõistlikkuse kohta on peamine viis leitud sõltuvuste valideerimiseks. Valdkonnaekspertid peavad võrdlema meie esitletavaid sõltuvusi enda kogemusega ning ütleva, mida nad oleksid tahtnud näha teisiti.

Õppuste järeldused. Avalikus sektoris korraldatakse regulaarselt õppusi, kus mängitakse läbi juhtumitele reageerimine. Neid juhtumeid on võimalik kirjeldada meie loodud formaalkeeles: saame fikseerida, milline sündmus toimub millisel hetkel pärast harjutuse algushetke. Me kirjeldame, et samaaegsed sündmused toimuvad samal ajal, kui on kirjas harjutuse stsenaariumis, ning võrdleme, kas meie töövahendite abil välja arvutatud sündmuste käik sarnaneb harjutuses juhtunuga. Sarnasust võib tõlgendada mitmeti. Seda, kas välja arvutatud ning harjutuse sündmuste arengus on põhimõttelisi erinevusi, peavad otsustama valdkonnaspetsialistid.

Juhtumiaruanded. Lisaks õppustele tuleb intsidente aeg-ajalt ette ka päris elus. Neil on oma algpõhjused ning nii nagu harjutuste stsenaariumides ette nähtud sündmuste puhul, saab ka nende algpõhjuseks olevaid sündmusi kirjeldada meie loodud formaalkeeles. Jällegi saab võrrelda, kas välja arvutatud sündmuste käik sarnaneb päriselt juhtunu ja juhtumiaruandes kajastatuga. Sedagi peab võrdlema ja otsustama valdkonnaspetsialist.

5.4. Valideerimise eesmärgid

Ristsõltuvuste valideerimisel ja valdkonnaekspertidega suhtlemisel on vähemalt kaks eesmärki, mida siinkohal kirjeldame.

Kodeerimise ja arvutuste kontroll. Esmaeesmärk on mõistagi hinnata meie enda tööd. Kui sõltuvuste kodeeringud ja arvutused annavad põhimõtteliselt õigeid tulemusi, siis saame nende arvutuste tulemust kasutada laiapidse riigikaitse toetamisel.

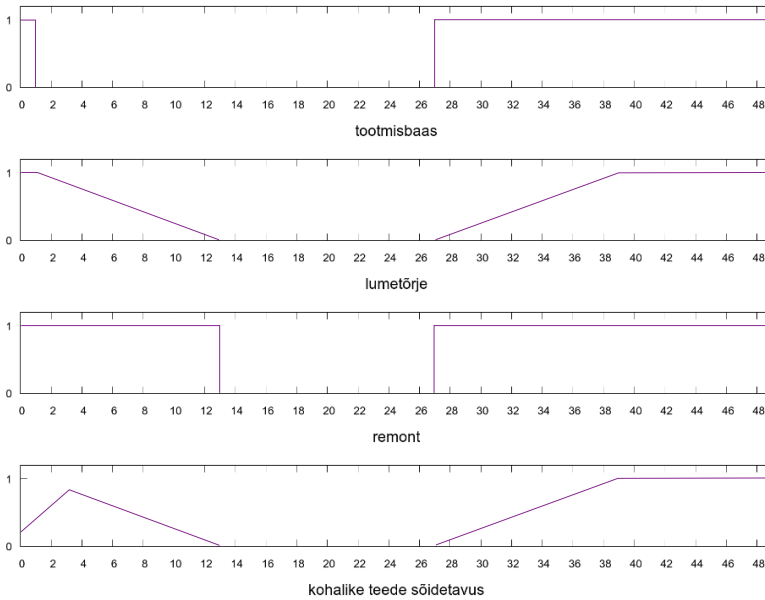
Modelleerimise õpetamine. Kaugem ja ehk isegi olulisem eesmärk on viia laiapidsele riigikaitsele oluliste teenuste (ja teiste ressursside) vaheliste sõltuvuste modelleerimine uuele tasemele. Valdkonnaekspertidega suheldes viime nendeni teadmuse sellest, kuidas nende koostatud riskianalüüsi kasutada. Samuti õpetame neid modelleerima sõltuvusi formaalkeeles. See on oluline tehtud töö jätkusuutlikkuse jaoks. Kuna Manticus Apollo projekti käigus tehtud töö on esimene katse kombineerida riskianalüüsi, õpetab see meile riskianalüüside esitamist ja struktureerimist nii, et kombineerimine õnnestuks. Tõenäoline on, et selle töö üks tulemus on soovitusid siseministri määruses esitatud metoodika parandamiseks.

5.5. Esimesest allikast pärit mudelite valideerimine

Elutähtsa teenuse osutajate riskianalüüside põhjal tehtud mudeleid oleme valideerinud intervjuudes valdkonnaspetsialistidega, näidates neile nende organisatsioonimudeli järgi tehtud stsenaariumide matkimistulemusi. Joonisel 2 on kujutatud tüüpilist tulemust. See põhineb Tallinna linna riskianalüüsi sel osal, mis puudutab kohalike teede sõidetavust. Matkitud on stsenaariumi, kus lumetõrjeks kasutatava tehnika tootmisbaas lakkab umbes ööpäevaks toimimast. Graafikutelt on näha, kuidas muutub sel juhul mõni muu oluline väärtus.

Meie tagasiside intervjuudest, mille aluseks olid üheainsa elutähtsa teenuse osutaja kohta tehtud mudelil koostatud stsenaariumide visualiseeringud, oli positiivne. Valdkonnaekspertid tunnistasid mudelite ja teenusekatkestusi illustreerivate stsenaariumide tulemused valiidsiks. Diskussiooni käigus tehti väiksemaid parandusi ja täiendusi (nt erinevate ajaliste väärtuste omavahelised suhted).

Senini on koostamata stsenaariumid, mis puudutaksid mitme elutähtsa teenuse osutaja teenuseid, ja valideerimata vastava matke tulemused. Veel ei ole selgunud seegi, kui lihtne on kombineerida erinevate elutähtsa teenuse osutajate riskianalüüside alusel loodud mudeleid.



Joonis 2. Üksteisest sõltuvate väärtuste ajaline muutus stsenaariumis

5.6. Teisest allikast pärit mudelite valideerimine

Analüütiku töövahendi loomine on järjepidev tegevus. Oleme tuvas-tanud, et stsenaariumide läbimängimine annab usutavaid tulemusi. Suuremahulisemaks valideerimiseks on aga tarvis suuremaid mudeleid.

6. Järeldused ja jätkutöö

Teenuste ja ressursside omavaheliste seoste modelleerimine ja matkimine on olnud Manticus Apollo projekti üks keskseid ülesandeid. Meie töö on esile toonud formaalse modelleerimise raskused, mis olid tingitud elutähtsa teenuse osutajate olemasolevate kirjelduste (sh riskianalüüsid) ebatäpsusest. Meie hinnangul ei olnud neid ebatäpsusi varem teadvustatud tasemel, mis avaldaks probleemide sügavuse, kui nende kirjelduste alusel uurida elutähtsate teenuste vahelisi ristsõltuvusi.

Ristsõltuvuste modelleerimise ja haavatavuste otsimise edukaks jätkamiseks tuleb sellele probleemile leida vastutaja (nt Riigikantseleis). Probleemi eest vastutaja ülesanne on luua koostöös elutähtsa teenuse osutajate esindajatega (valdkonnaspetsialistidega) mudel, mis kirjeldab erinevaid

elutähtsaid teenuseid ja nende osutamiseks vajalikke ressursse üksteisega seotuna. Samuti on tema ülesanne välja töötada stsenaariume kriitilise infrastruktuuri nõrkade kohtade leidmiseks või lihtsalt kriitilise infrastruktuuri toimimise kontrollimiseks erinevates oluliseks peetavates stsenaariumides.

Loodav mudel koondaks ühte kohta kirjelduse erinevate elutähtsa teenuse osutajate toimimisest. Paljud elutähtsa teenuse osutajad on eraettevõtted. Nad ei pruugi soovida jagada oma toimimise detaile ei riigistruktuuride ega – enamgi veel – teiste ettevõtetega. Samuti loob selline mudel ühe koha, kust võimalik ründaja saaks väga palju informatsiooni Eesti kriitilise infrastruktuuri toimimise ja nõrkade külgede kohta. Seetõttu tuleb sellist mudelit luues, uuendades ja kasutades läbi mõelda mudeli osadele ligipääsu piirangud ning kasutada nende piirangute kehtestamiseks võimaluse korral privaatsust kaitsvaid tehnoloogiaid.

Kui kasutajaliides, mille kaudu mudelit koostatakse, on piisavalt lihtne, suudab iga elutähtsa teenuse osutaja esindaja koostada ise oma elutähtsa teenuse osutajat puudutava osa mudelist. Seejuures vajab ta ligipääsu teiste elutähtsa teenuse osutajate mudelitele ainult neis kohtades, kus üks elutähtsa teenuse osutaja kasutab teise osutatavaid teenuseid. Samuti vajab stsenaariumide koostamine ainult kirjeldusi sündmustest, mis võivad mõjutada erinevate elutähtsa teenuse osutajate teenuseid. Üksnes matke jaoks vajalikud arvutused vajavad ligipääsu tervele mudelile. Meil on kavas uurida, kuidas kasutada privaatsust kaitsvate arvutuste tehnoloogiaid, et kaitsta seda mudelit matkemodelleerimisel.

Kirjandus

- Boender, J.; Ivanova, M. G.; Kammüller, F.; Primiero, G.** 2014. Modeling Human Behaviour with Higher Order Logic: Insider Threats. – 4th Workshop on Socio-Technical Aspects of Security and Trust, pp. 31–39.
- Chang, S. E.; McDaniels, T.; Beaubien, C.** 2009. Societal impacts of infrastructure failure interdependencies: Building an empirical knowledge base. – Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Conference (TCLEE) 2009: Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment, pp. 1–10.
- Clarke, E. M.** 2008. The Birth of Model Checking. – Grumberg, O.; Veith, H. (eds.). 25 Years of Model Checking: History, Achievements, Perspectives. Lecture Notes in Computer Science (Springer), Vol. 5000, pp. 1–26.
- Damm, W.; Dierks, H.; Disch, S.; Hagemann, W.; Pigorsch, F.; Scholl, C.; Waldmann, U.; Wirtz, B.** 2012. Exact and fully symbolic verification of linear hybrid automata with large discrete state spaces. – Science of Computer Programming, Vol. 77, Issues 10–11, pp. 1122–1150.

- Dudenhofer, D. D.; Permann, M. R.; Manic, M.** 2006. CIMS: A Framework for Infrastructure Interdependency Modeling and Analysis. – Perrone, L. F.; Lawson, B. G.; Liu, J.; Wieland, F. P.; Nicol, D. M.; Fujimoto, R. M. (eds.). Proceedings of the Winter Simulation Conference WSC 2006, pp. 478–485.
- ETTRP** = Elutähtsa teenuse toimepidevuse riskianalüüsi ja plaani, nende koostamise ning plaani kasutuselevõtmise nõuded ja kord. – Riigi Teataja I, 28.06.2017, 6.
- Eusgeld, I.; Kröger, W.** 2008. Comparative Evaluation of Modeling and Simulation Techniques for Interdependent Critical Infrastructures. Scientific Report, Laboratory for Safety Analysis. Zurich: ETH Zurich (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich).
- Galbusera, L.; Trucco, P.; Giannopoulos, G.** 2020. Modeling interdependencies in multi-sectoral critical infrastructure systems: Evolving the DMCI approach. – Reliability Engineering and System Safety, Vol. 203, Article No. 107072, 15 pages.
- Garvey, P. R.; Pinto, C. A.** 2009. Introduction to functional dependency network analysis. – The MITRE Corporation and Old Dominion University, Second International Symposium on Engineering Systems, Vol. 5. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology (MIT).
- Henzinger, T. A.** 1996. The Theory of Hybrid Automata. – Proceedings 11th Annual IEEE Symposium on Logic in Computer Science, pp. 278–292.
- Hädaolukorra seadus.** – Riigi Teataja I, 17.05.2020, 3.
<https://www.riigiteataja.ee/akt/117052020003> (02.12.2020).
- Kammüller, F.; Probst, C. W.** 2017. Modeling and Verification of Insider Threats Using Logical Analysis. – IEEE Systems Journal, Vol. 11, No. 2, pp. 534–545.
- Luht, L.** 2020. Kriitiline infrastruktuur ja koostöö erasektoriga. – Maaten, E.; Vaks, T. (koost). Riigi küberturvalisuse käsiraamat. Tallinn: E-riigi Akadeemia, lk 35–41.
- Luijif, E. A. M.; Klaver, M. H. A.** 2004. Protecting a Nation's Critical Infrastructure: The First Steps. – 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp. 1185–1190.
- Manticus Apollo** 2020. Manticus Apollo terminiloend. Ülesanne 1.1. Terminoloogia (terminiloend). Versioon 1.0. Projekti teostajad Cybernetica AS, Tallinna Tehnikaülikool, Tartu Ülikool, Kaitseväe Akadeemia. Esitatud 7. septembril.
- McDaniels, T.; Chang, S.; Peterson, K.; Mikawoz, J.; Reed, D.** 2007. Empirical Framework for Characterizing Infrastructure Failure Interdependencies. – Journal of Infrastructure Systems, Vol. 13, Issue 3, pp. 175–184.
- Motus, L.; Meriste, M.; Preden, J-S.; Pahtma, R.** 2012. Self-aware Architecture to Support Partial Control of Emergent Behavior. – Proceedings of the IEEE 7th International Conference on System of Systems Engineering. Genoa, Italy. July 16–19, pp. 422–427.
- Ouyang, M.** 2014. Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems. – Reliability Engineering and System Safety, Vol. 121, pp. 43–60.
- Panzieri, S.; Setola, R.; Ulivi, G.** 2005. An approach to model complex interdependent infrastructures. – IFAC Proceedings, Vol. 38, Issue 1, pp. 404–409.

- Rinaldi, S. M.; Peerenboom, J. P.; Kelly, T. K.** 2001. Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. – IEEE Control Systems Magazine, Vol. 21, Issue 6, pp. 11–25.
- Zhang, P.; Peeta, S.** 2011. A generalized modeling framework to analyze interdependencies among infrastructure systems. – Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 45, Issue 3, pp. 553–579.
- Trucco, P.; Cagno, E.; De Ambroggi, M.** 2012. Dynamic functional modelling of vulnerability and interoperability of Critical Infrastructures. – Reliability Engineering and System Safety, Vol. 105, pp. 51–63.
- Tsuruta, M.; Goto, Y.; Shoji, Y.; Kataoka, S.** 2008. Damage propagation caused by interdependency among critical infrastructures. – The 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, China. October 12–17.
- VTATP 2017** = Valdkondliku teadus- ja arendustegevuse tugevdamise programmi (RITA) tegevuse 1 „Strateegilise TA tegevuse toetamine“ ülesanne „Tervikliku olukorrateadlikkuse võime loomine riigikaitseks“ 2017. 29. detsember, 25 lk.

Lisad

Lisa 1. Esimene metamudel

Metamudeli põhimõiste on *ajaline väärtus*, mis kujutab endast funktsiooni ajahetkede hulgast skalaarväärtuste hulka. See tähendab, et ajaline väärtus seab igale ajahetkele vastavusse mingi väärtuse. Ajahetkede hulga T samastame siinses metamudelis reaalarvude hulgaga R . Seejuures tähistab 0 vabalt valitud, kuid fikseeritud algushetke, ning ühikintervall on samuti vabalt valitud, kuid fikseeritud pikkusega. Oma mudelites oleme tavaliselt ühikintervalli pikkuseks määranud ühe tunni. Skalaarväärtused võivad olla arvulised, st tulla hulgast R , või olla tõeväärtused. Kaheelemendist hulka {tõene, väär} tähistame siinkohal sümboliga B . Mingi ajaline väärtus on seega kas funktsioon tüübiga $R \rightarrow R$ (arvuline väärtus) või funktsioon tüübiga $R \rightarrow B$ (tõeväärtus).

Ajalistest väärtustest saab konstrueerida *ajalisi avaldisi*. Ajaline avaldis võib olla üks alljärgnevatest.

- Kui v on ajaline väärtus, siis on see ka ajaline avaldis. Ajalised avaldised on samuti kas arvulised või tõeväärtuslikud.
- Kui c on mingi arv või tõeväärtus, siis on see ka ajaline avaldis. Ta omandab igal ajahetkel ühe ja sama väärtuse c .
- Kui E_1, E_2 on ajalised avaldised ja c on arv, siis $E_1 + E_2, c \cdot E_1, E_1 \leq E_2, E_1 \& E_2, \neg E_1$ on samuti ajalised avaldised. Siin eeldab osa operatsioone, et E_1 ja E_2 on arvulised, teised jällegi eeldavad, et need on tõeväärtuslikud. Samuti on osa operatsioonide tulemus arvuline, teistel tõeväärtuslik. Moodustatud avaldise väärtus mingil ajahetkel leitakse E_1 ja E_2 väärtustest selsamal ajahetkel, rakendades sedasama operatsiooni.
- Kui E_1 on tõeväärtuslik ajaline avaldis ning E_2, E_3 on ühte ja sama tüüpi ajalised avaldised, siis „kui E_1 , siis E_2 , muidu E_3 “ on samuti ajaline avaldis. Jällegi, selle avaldise väärtus mingil ajahetkel on kas E_2 või E_3 väärtus sellel ajahetkel, olenevalt E_1 väärtusest sel ajahetkel.
- Kui E on ajaline avaldis ja c on mittenegatiivne arv, siis viide $_c(E)$ on samuti ajaline avaldis. Selle avaldise väärtus ajahetkel t on võrdne avaldise E väärtusega ajahetkel $(t - c)$.
- Kui E on tõeväärtuslik ajaline avaldis ja c on mittenegatiivne arv, siis int $_c(E)$ on arvuline ajaline avaldis. Selle avaldise väärtus ajahetkel t on võrdne ajalõigu $[t - c, t]$ nende osade kogupikkusega, kus avaldis E oli tõene.
- Kui E on arvuline ajaline avaldis ja c on mittenegatiivne arv, siis max $_c(E)$ on samuti arvuline ajaline avaldis. Selle avaldise väärtus ajahetkel t on võrdne avaldise E maksimaalse väärtusega ajalõigus $[t - c, t]$.
- t ise on ka ajaline avaldis, mis mingil ajahetkel on võrdne selle ajahetke väärtusega.

Lisaks integreerimistele ja ekstreemumi leidmistele üle kindla pikkusega ajalõikude on meil soov käsitleda ka ajalõike, mis algavad mingist sündmusest. Selline sündmus võib toimuda stsenaariumi järgi, aga võib tähendada ka mingi tingimuse täitumist. Sündmustest rääkimiseks toome sisse *sündmuslikud* ajalised väärtused. Need on samuti funktsioonid tüübiga $\mathbf{R} \rightarrow \mathbf{B}$, kuid nende jaoks nõuame, et nad oleksid tõesed ainult üksikutel ajahetkedel, mitte -lõikudel. Me loeme seega, et mingi sündmus toimub kindlal ajahetkel. See võib toimuda mitu korda, aga need korrad on üksteisest eraldatud ajavahemikega, kus see sündmus ei toimu. Sündmuslikke ajalisi avaldisi saab luua ja kasutada järgmiselt.

- Kui E on tõeväärtuslik ajaline avaldis, siis $\uparrow(E)$ on sündmuslik ajaline avaldis. See avaldis on tõene neil hetkedel, kus E väärtus muutub väärast tõeseks.
- Kui S_1 ja S_2 on sündmuslikud ajalised avaldised, siis $S_1 \vee S_2$ on samuti sündmuslik ajaline avaldis. See on tõene neil hetkedel, kus S_1 või S_2 on tõene.
- Kui E on tõeväärtuslik ajaline avaldis ja S on sündmuslik ajaline avaldis, siis $\text{int}_S(E)$ on arvuline ajaline avaldis. Selle avaldise väärtus ajahetkel t on võrdne ajalõigu $[v(S; t), t]$ nende osade kogupikkusega, kus avaldis E oli tõene. Siin tähistab $v(S; t)$ viimast ajahetke enne hetke t , kus S oli tõene.
- Kui E on arvuline ajaline avaldis ja S on sündmuslik ajaline avaldis, siis $\text{max}_S(E)$ on samuti arvuline ajaline avaldis. Selle avaldise väärtus ajahetkel t on võrdne avaldise E maksimaalse väärtusega ajalõigus $[v(S; t), t]$.

Kasutades ajalisi avaldisi, esitatakse sõltuvuste mudel võrrandite $x = E$ hulgana, kus x on ajaline väärtus ja E on ajaline avaldis.

Lisa 2. Teine metamudel

Metamudeli põhimõiste on sõltuvusgraaf. Tipp selles graafis tähistab (loogilist) kohta, kus mingit ressursi või teenust jagatakse, töödeldakse või kogutakse. Suunatud serv ühest tipust teise tähistab, et teises tipus kasutatakse ressursi või teenust, mida saab esimesest tipust. Graafi sisendtipud kirjeldavad primaarseid ressursse, mida saab kasutada mingite teenuste pakkumiseks. Need võivad vastata tööjõule, põhivaradele, aga samuti sündmustele, mis võivad toimuda. Graafi väljundtipud kirjeldavad ühiskonna esmast nõudlust teenuste järele, nagu vältimatu abi või teede sõidetavus. Serv tähistab kahtepidi sõltuvust: esimese tipu pakkumine mõjutab teise tipu pakkumist ja teise tipu nõudlus mõjutab esimese tipu nõudlust.

Meie esimese metamudeli ajalised väärtused on nüüd seotud graafi servadega. Iga servaga on seotud kaks ajalist väärtust, mis väljendavad, kui palju ressursi igal ajahetkel üle selle serva pakutakse ja kui palju tahetakse üle selle serva ressursi saada. Kui esimene neist arvudest on vähemalt sama suur kui teine, siis on sellel serval nõudlus rahuldatud.

Peale sisend- ja väljundtippude on graafis veel eri tüüpi tippe, mis vastavad eri operatsioonidele teenuste ja ressursidega. *Kombineerimistipud* saavad oma sisendi ühest või enamast tipust ja annavad ühe väljundi. Need tipud vastavad ressurside ja teenuste töötlemisele. Iga kombineerimistipuga on seotud *valem* (sama, mis ajaline avaldis esimeses metamudelis, aga ilma temporaalsete operatsioonideta). See valem kirjeldab, kui palju saab toota väljundit etteantud sisendikogusest. *Jagamistipud* on duaalsed kombineerimistippudega. Neil on üks sisenev serv, mis vastab mingile sissetulevale ressursile või teenusele, ja mitu väljuvat serva, mida mööda sama ressurs või teenus edasi antakse. Ka jagamistipuga on seotud valem, mis kirjeldab, kui palju peab olema sisenevat ressursi, et igal väljundil saaks olla niisugune ressursikogus, nagu seal on. Üldjuhul on jagamistipu valemiks summa (kui tegemist on ressursiga, mida peab jagama, nt vedelkütus) või maksimum (kui tegemist on ressursiga, mida on võimalik kõigil koos kasutada, nt mobiilside).

Esimese metamudeli temporaalsete avaldistega on analoogilised *viivitamistipud*, millel on üks sisenev ja üks väljuv serv. Neid on kahte sorti: pakkumise ja nõudluse viivitamise tipud. Igaühega neist on seotud kaks mittenegatiivset arvu, mis näitavad, kui palju on pakkumise kasv ja kahanemine väljuval või nõudluse kasv ja kahanemine siseneval serval ajalisel tagapool pakkumise kasvust ja kahanemisest siseneval või nõudluse kasvust ja kahanemisest väljuval serval.

Teises metamudelis loeme, et aeg on diskreetne, seega meie ajalised väärtused on tüüpi $Z \rightarrow R$. Väärtused sisendtippudest väljuvatel ja väljundtippudesse sisenevatel servadel annavad meile primaarsete ressurside pakkumise ja esmaste teenuste nõudluse, nii nagu need ajas muutuvad. Pakkumised ja nõudlused sisemistel servadel leiame iga ajahetke jaoks niimoodi, et kombineerimis- ja jagamistippudes olevate valemitega määratud kitsendused oleksid rahuldatud ja võimaluse korral oleks igal serval pakkumine vähemalt sama suur kui nõudlus. Kui see ei ole võimalik,

siis loeme, et mudel leiab endale igal ajahetkel tasakaalupunkti, kus nõudluse ja pakkumise vahe on võimalikult väike. Selle tasakaalupunkti otsimist on võimalik kirjeldada diferentsiaalvõrrandite süsteemiga, mida saab lahendada numbriliste meetoditega.

PEETER LAUD, PhD

Cybernetica AS-i teadusdirektor

HAYRETDIN BAHŠI, PhD

Tallinna Tehnikaülikooli professor

ALEKSANDR LENIN, PhD

Cybernetica AS-i teadur ning Tallinna Tehnikaülikooli lektor

KALEV MÄNDMAA, MA

Cybernetica AS-i projektijuht

JAAN PRIISALU, MSc

Tallinna Tehnikaülikooli doktorant-nooremteadur ja analüütik

REEDIK TUULING

Cybernetica AS-i programmeerija