

Agenttipohjainen mallinnus ja sen käyttö COVID-19-taudin leviämisen tutkimisessa

LuK-tutkielma
Viivi Aaltonen
2577638
Matemaattisten tieteiden laitos
Oulun yliopisto
Syksy 2020

Sisällys

Johdanto	2
1 Mitä agenttipohjainen mallinnus on?	3
2 Agenttipohjaisen mallinnuksen käyttö	4
2.1 Agenttipohjaisen mallinnuksen vahvuudet	4
2.2 Agenttipohjaisen mallinnuksen heikkoudet	4
3 Agenttipohjaisen mallinnuksen hyödyntäminen COVID-19-taudin leviämisen tutkimisessa	6
3.1 Mallinnusta varten rakennettu ympäristö	6
3.2 Mallinnuksessa käytetyt agentit sekä niiden sijoittaminen ympäristöön	7
3.3 Tietoa mallinnuksesta	8
3.4 Mallinnuksessa käytetty SEIRD-malli	9
3.5 Mallinnuksen ajanjakso	10
3.6 Vertailu mallinnuksen ja oikean elämän tartuntojen määrän välillä	10
3.7 Taudin leviämisen hillitsemiseksi käytetyt strategiat	11
3.8 Mallinnuksen lopputulokset	15
4 Yhteenveto	17
Lähdeluettelo	18

Johdanto

Elämä maapallolla oli aiemmin paljon yksinkertaisempaa, kuin nykyään. Tämä johtui siitä, että esimerkiksi keskiajalla ei ollut tarpeellista tietää monimutkaisia syy-seuraussuhteita asioiden välillä. Riitti, että tunnettiin yksinkertaisten systeemien toiminta ja niiden vaikutukset pienellä alueella. Ihminen ymmärtää nykyään yksinkertaiset systeemit hyvin, joten hän haluaa kehittää ymmärrystään monimutkaisempiin asioihin. Tekniikan ja tieteen kehittymisen myötä se myös on mahdollista. Nykyään halutaan esimerkiksi tietää, miten päästöt vaikuttavat ilmaston lämpenemiseen tai miten yhden maan taloudelliset päätökset vaikuttavat koko maailman talouteen. Tällaisten asioiden mallintamiseen ja sitä kautta tutkimiseen voidaan käyttää agenttipohjaista mallinnusta (eng. Agent-based modeling, ABM). Tutkielmassani esittelen mitä agenttipohjainen mallinnus on ja miten sitä on hyödynnetty COVID-19-taudin leviämisen tutkimisessa. Tutkielman alkuosassa on käytetty lähteenä U. Wilenskyja, W. Rand: *An Introduction to Agent-Based Modeling* kerrottaessa, mitä agenttipohjainen mallinnus on sekä sen vahvuuksista ja heikkouksista. Toisena lähteenä on käytetty N. M. Gharakhanlou, N. Hooshang: *Spatio-temporal simulation of the novel coronavirus (COVID-19) outbreak using the agent-based modeling approach (case study: Urmia, Iran)* tarkasteltaessa COVID-19-taudin leviämistä agenttipohjaisen mallinnuksen avulla.

1 Mitä agenttipohjainen mallinnus on?

Agenttipohjaisen mallinnus on laskennallisen mallinnuksen muoto, joka perustuu agentteihin. Mallinnuksessa agentit ovat itsenäisiä ja spontaaneja yksilöitä, jotka toimivat ilman ylemmältä taholta tulevia ohjeita. Agentit voivat olla mitä tahansa, mitä mallinnuksen avulla halutaankaan tutkia, kuten ihmisiä, eläimiä, atomeja tai taloja. Yksinkertainen esimerkki mallinnuksesta on peto-saalis-suhteen mallinnus, jossa agentteina ovat peto- ja saaliseläimet. Pelkkien agenttien nimeämisen lisäksi kaikille agenteille on annettu ominaisuuksia, jotka määrittävät niiden käyttäytymistä mallinnuksessa. Ominaisuuksia voivat olla esimerkiksi nopeus, massa tai ikä. Peto-saalis-suhteen mallinnuksessa sekä saaliiden, että petojen ominaisuuksia olisivat energiataso, sijainti sekä suunta, johon ne ovat liikkumassa. Käyttäytymisominaisuus olisi kummallakin liikkuminen. Eläinten energiataso vähenee niiden liikkuessa ja kasvaa niiden syödessä. Jos energiataso pääsee tippumaan liian alas, kyseinen yksilö kuolee. Jos taas energiataso nousee tarpeeksi korkealle, eläimet voivat lisääntyä. Liikkuessaan tiettyyn suuntaan eläimet saattavat osua ruoan kohdalle, jolloin ruoka tulee syödyksi. Petojen tapauksessa ruokaa ovat saaliseläimet ja saaliiden tapauksessa esimerkiksi heinä. Kolmas asia, joka agenttipohjainen mallinnusta varten on määritettävä, on ympäristö, jossa agenttien toimintaa tarkkaillaan. Ympäristö voi olla täysin tietokoneella luotu, geometrinen tai oikean elämän ympäristön perusteella luotu. Peto-saalis-suhteen mallinnuksessa ympäristö voisi olla esimerkiksi niitty, jonka tietyistä osista löytyy saaliseläinten ravinnoksi kelpaavaa heinää. Kyseisessä mallinnuksessa voidaan tarkkailla, miten peto-saalis-suhde muuttuu eläinten ollessa vuorovaikutuksessa toistensa tai luodun ympäristön kanssa. Lisäksi mallinnuksessa voitaisiin tutkia mitä peto-saalis-suhteelle tapahtuisi, jos eläinten ominaisuuksia tai luotua ympäristöä muokattaisiin.

2 Agenttipohjaisen mallinnuksen käyttö

Agenttipohjaisen mallinnuksen avulla on mahdollista tutkia hyvin monimutkaisia ilmiöitä, joihin muut mallintamismenetelmät eivät välttämättä soveltu. Käsiteltävässä mallinnuksessa on kuitenkin omat heikkoutensa verrattuna muihin mallinnusmenetelmiin.

2.1 Agenttipohjaisen mallinnuksen vahvuudet

Agenttipohjainen mallinnus soveltuu erityisen hyvin tilanteisiin, joissa agenttien sekä agenttien ja ympäristön välinen vuorovaikutus on monimutkainen, asiat tapahtuvat niissä ennalta-arvaamattomasti ja tutkitut elementit eivät ole homogeenisia. Lisäksi erilaiset luonnolliset ilmiöt soveltuvat hyvin ABM:lla mallinnettaviksi. ABM:n avulla voidaan luoda erilaisia skenaarioita tapahtumien kulusta, tutkia agenttien tai ympäristön muutosten vaikutusta lopputulokseen ja pyrkiä ymmärtämään tapahtuneita ilmiöitä. Mallinnuksessa tutkittuja agenteja voi olla kymmenistä miljooniin, mikä selittää, miksi se on erityisen hyvä monimutkaisten tapahtumien mallintamiseen. Yksi ABM:n hyvistä puolista on se, ettei sen mallinnuksen seuraaminen vaadi henkilöltä ymmärrystä esimerkiksi matematiikasta tai etukäteen tietoa tutkittavasta ilmiöstä. Mallinnuksessa käytetyt agentit ominaisuuksineen ovat yleisesti käytettyjä arkikielessä, jolloin kaikkien on helppo ymmärtää, mitä ilmiössä tapahtuu. ABM:ssa ilmiön tarkastelu on myös mahdollista sekä yksittäisen agentin tai elementin tasolla että usean elementin muodostaman kokonaisuuden tai koko ilmiön tasolla. Esimerkiksi on mahdollista tutkia yhden agentin koko historiaa mallinnuksen ajalta tai tarkkailla monen agentin muodostamaa yhteisöä ja sen toimintaa. Tietyt agentit saattavat mallinnuksessa alkaa hylkiä toisia agenteja tai suosia joitain toisia. Niiden on siis mahdollista oppia muiden agenttien ja ympäristön kanssa käydystä vuorovaikutuksesta, miten toimia milloinkin. Esimerkiksi kalastajan käydessä eri paikoissa kalassa hän saattaa alkaa hylkiä paikkoja, joista hän ei ole saanut kalaa ja suosia niitä, joista kalaa on tullut. Kaiken lisäksi agenttipohjaisen mallinnuksen avulla on mahdollista tarkastella monipuolisesti koko tapahtunutta prosessia pelkän lopputulosten havaitsemisen sijaan. Esimerkiksi pörssimarketeilla voidaan tarkastella kaikkien ostajien ja myyjien tekemiä päätöksiä, eikä vain koko pörssin loppusummaa.

2.2 Agenttipohjaisen mallinnuksen heikkoudet

Vaikka agenttipohjainen mallinnus sopii hyvin moneen käyttötarkoitukseen, on silläkin omat haitta puolensa ja hankaluutensa. Esimerkiksi joissain tilan-

teissa ABM:n rakentamisen kulut ovat paljon suuremmat, kuin mallinnuksesta saatu hyöty. Tällaisia voivat olla hyvin yksinkertaiset tilanteet, joissa on tarpeellista tietää vain lopputilanne ja tutkittavat tekijät ovat homogeenisia, eikä niitä ole suurta määrää. Tällöin agenttipohjainen mallinnus ei ole paras vaihtoehto mallinnuksen suorittamiseen. Eräs hankaluus ABM:ssa on se, että mallinnuksen rakentamista varten on tiedettävä joitain agenttien ominaisuuksia, jotta mallinnukseen luotavat agentit ominaisuuksineen ja ympäristö vastaavat tutkittavaa ilmiötä. Kappaleessa (3) kuvatun COVID-19-taudin leviämisen mallintamisessa on oleellista tietää tutkitun kaupungin väkiluku, opiskelijoiden ja eri työntekijöiden lukumäärä sekä millä kulkuneuvoilla ihmiset liikkuvat työpaikoille ja kouluihin. Toisaalta taas koko ilmiön kaikkien osien muodostamaa kokonaisuutta ei ole välttämätöntä tietää etukäteen. Hyödyllistä kuitenkin on, jos asiasta on jokin ennakkokäsitys, jolloin havaittua tulosta voidaan verrata ennakkokäsitykseen tai arvaukseen ja tarvittaessa muuttaa agenttien ominaisuuksia tai ympäristöä, jotta samaan tapahtumaan päästäisiin.

3 Agenttipohjaisen mallinnuksen hyödyntäminen COVID-19-taudin leviämisen tutkimisessa

COVID-19-taudin leviämisen tutkimista varten on rakennettu useita agenttipohjaisia mallinnuksia, joiden avulla on tutkittu erilaisten toimenpiteiden vaikutusta taudin leviämiseen. Kahden iranilaisen tutkijan luoman agenttipohjaisen mallinnuksen avulla on tutkittu COVID-19-taudin leviämistä ja siihen vaikuttavia tekijöitä Iranin Urmiassa. Mallinnuksessa tutkittiin Iranissa sijaitsevaa kaupunkia Urmiaa, jonka asukkaat sekä talot toimivat agenteina ja kyseinen kaupunki ympäristönä. Tutkimuksen päätavoitteena oli kehittää malli, jonka avulla voitaisiin ennustaa taudin leviämistä ajan kuluessa, sekä tutkia, miten erilaiset viruksen leviämistä hillitsevät sekä mahdollisesti estävät strategiat vaikuttaisivat tartuntalukujen kasvuun. Mallinnuksessa käytetyt strategiat olivat koulujen sulkeminen, turvavälien huomiointi ja toimistojen sulkeminen. Tutkimusta varten rakennettu ympäristö ja agenttien ominaisuudet tehtiin helposti muokattaviksi, jotta niitä voitaisiin muuttaa käyttötarkoituksen mukaisiksi. Lisäksi käytetty mallinnus tehtiin hyvin joustavaksi, jotta voitiin tutkia kolmea erilaista strategiaa ja niiden vaikutusta viruksen leviämiseen.

3.1 Mallinnusta varten rakennettu ympäristö

Tutkimuksessa rakennettuna ympäristönä oli yksinkertainen mallinnus Iranin miljoonakaupungista Urmiasta. Kaupungin yläpuolelta otettujen kuvien ja asukastiheyden perusteella luotiin mallinnusta varten yksinkertaistettu versio Urmiasta. Luotu ympäristö jaettiin 2,0 m x 2,0 m soluihin, joihin sijoituivat ihmisten kodit, työpaikat, tiet ja koulut. Ympäristön rakentamisessa oli oleellista ottaa huomioon taudin leviäminen, sillä siihen vaikutti agenttien eli ihmisten olinpaikka ja liikkuminen. Siksi ympäristöä rakennettaessa huomioitiin, että ympäristö sisälsi paikkatiedot ihmisten asuinpaikoista sekä julkisista tiloista, joissa ihmiset todennäköisesti vierailisivat. Ympäristö sisälsi Urmian asuinalueet, koulut, toimistot sekä liiketoiminnan kannalta oleelliset alueet, asumistiheyden eri alueilla ja tiet. Mallinnuksessa käytettiin tilastollisia tietoja Urmian kaupungista, kuten asukkaiden sekä kotitalouksien määriä, ikäjakaumaa sekä opiskelijoiden ja eri aloilla työskentelevien lukumääriä, jotta mallinnus yksinkertaistuksesta huolimatta oli Urmian kaupungin mallintamiseen sopiva.

3.2 Mallinnuksessa käytetyt agentit sekä niiden sijoittaminen ympäristöön

Koska taudin on havaittu siirtyvän vain ihmiseltä toiselle, eikä taudin siirtymiseen liity esimerkiksi eläimiä, on ne jätetty tutkimuksen ulkopuolelle. Ympäristö koostui kahdenlaisista agenteista, joista toisia olivat talot ja toisia ihmiset. Yksi ihmis- tai taloagentti rakennetussa ympäristössä edusti yhtä ihmistä tai taloa oikeassa elämässä. Aluksi soluihin lisättiin taloja, joiden määrä perustui Urmian kotitalouksien määrään. Taloja sijoitettiin viiteen eri asuinalueeseen tilastoihin perustuvien asukastiheyksien mukaan. Tämän jälkeen ympäristöön luotiin agentit, jotka sijoitettiin tilastoihin perustuvien kotitalouksien ja niiden asukasmäärien mukaan taloihin. Mallinnuksessa käytettyjen agenttien ominaisuudet on esitetty taulukossa 1. Taulukossa 2 on esitetty ihmisagenttien tarkennetut ominaisuudet, jotka liittyvät COVID-19-taudin tarttumiseen ja leviämiseen. Määriteltyjen ominaisuuksien lisäksi ihmisagenteilla oli yksi käyttäytymistapa, joka oli liikkuminen.

Taulukko 1: Mallinnuksessa käytettyjen agenttien ominaisuudet.^[2]

Taloagenttien ominaisuudet	Ihmisagenttien ominaisuudet
Talon tunnistus	Ihmisen tunnistus
x-koordinaatti	x-koordinaatti
y-koordinaatti	y-koordinaatti
	Ikä
	Sukupuoli
	Terveystila
	Taudin itämisaika
	Toipumisaika
	Työpaikan ja kodin x- ja y-koordinaatit
	Hetkelliset x- ja y-koordinaatit
	Oman kodin tunnistus
	R0-arvo
	Henkilökohtaisen auton omistaminen (Tosi/Epätosi)
	Kuolleisuusaste
	Turvavälin huomioiminen (Tosi/Epätosi)

Taulukko 2: Ihmisagenttien tarkennetut ominaisuudet taudin leviämiseen liittyen.^[2]

Parametri	Arvojen vaihteluväli
Altistumisen kesto	2-14 päivää
Toipumisaika	14-28 päivää
R0-arvo	2,06-2,52
Kuolleisuusaste:	
0-5-vuotiaille	0 %
6-24-vuotiaille	0-0,2 %
25-64-vuotiaille	0,2-3,5 %
yli 65-vuotiaille	2,5-4 %
Taudin leviämisen todennäköisyys	2,5 %

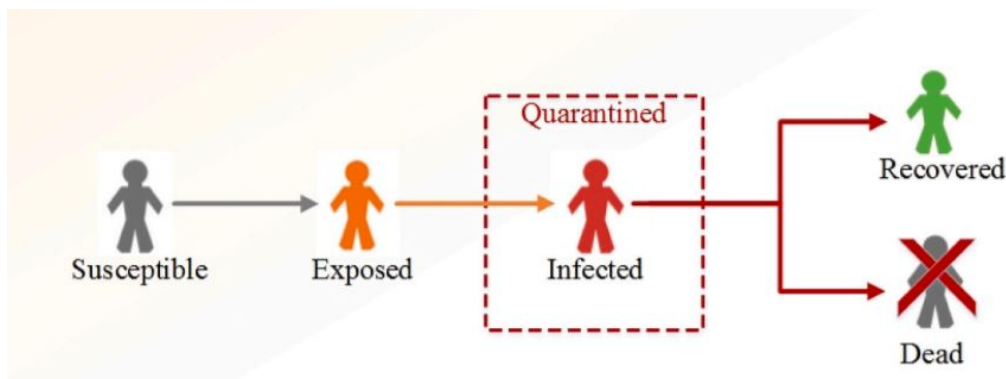
3.3 Tietoa mallinnuksesta

Mallinnuksessa ihmisagenttien liikkuminen kodin ja työpaikan tai kodin ja koulun välillä tapahtui joko yksityisillä tai julkisilla kulkuneuvoilla. Mallinnuksessa ihmisagentit oli jaettu neljään ikäryhmään Urmian ikäjakaumaan perustuvan tilaston mukaan. Ikäjakaumat olivat 0-5-vuotiaat, 6-24-vuotiaat, 25-64-vuotiaat ja yli 64-vuotiaat. Ihmisagentit, jotka kuuluivat kahteen viimeisimpään ikäluokkaan, saattoivat omistaa henkilökohtaisen kulkuneuvon ja heistä 63 % omisti jonkinlaisen kulkuneuvon (luku perustuu tilastoon Urmian henkilökohtaisen kulkuneuvon omistajista). Muiden ihmisagenttien oletettiin kulkevan julkisilla kulkuneuvoilla. Ihmiset oli jaettu ammatin perusteella neljään eri luokkaan; virkamiehiin, yrittäjiin ja opiskelijoihin. Neljäs luokka sisälsi kaikki edellisiin luokkiin kuulumattomat. Oletuksena oli, että opiskelijat ovat 5-24 vuotiaita ja kaikki työntekijät olivat ainakin 24-vuotiaita. Myös nämä luvut perustuivat tilastoihin. Ihmisagentit, jotka liikkui omilla kulkuneuvoillaan, eivät voineet altistua taudille matkan aikana, toisin kuin julkisia kulkuneuvoja käyttäneet. Työpaikat oli jaettu satunnaisesti ihmisille ja osa heistä työskenteli kouluissa tai toimistoissa ja osa yrityksissä. Työpaikka pysyi samana koko simulaation ajan. Mallinnuksessa agentit päivittyivät 15 minuutin välein ja heidän terveydentilansa tarkistettiin myös 15 minuutin välein, sillä 15 minuuttia on aika, joka agenttien tuli viettää alle kahden metrin päässä toisistaan altistuakseen. Agenttien päivitys tarkoitti esimerkiksi niiden olinpaikan ja terveydentilan mahdollista muuttumista aiempaan. Mallinnuksessa vuorokausi oli jaettu neljään ajanjaksoon. Ensimmäisen jakson aikana ihmisagentit siirtyvät kouluun tai työpaikalle käyttäen julkisia tai henkilökohtaisia kulkuneuvoja heille annettujen ominaisuuksien

mukaan. Jos agentti matkusti julkisilla kulkuneuvoilla, oli hänen mahdollista altistua taudille, joten julkisilla kulkuneuvoilla matkustaneiden terveydentila tutkittiin myös matkan aikana. Toisen ajanjakson aikana ihmiset työskentelivät tai opiskelevat ja taudin leviäminen tutkittiin näissä paikoissa. Kolmannen ajanjakson aikana ihmiset palasivat koteihinsa samalla kulkuvälineellä, kuin he aamulla menivät töihin tai kouluun ja jälleen taudin mahdollinen leviäminen tutkittiin julkisia kulkuneuvoja käyttäneiltä agenteilta. Neljännessä ajanjaksossa ihmisagentit pysyivät kotonaan ja taudin leviäminen tutkittiin jälleen. Tällä kertaa tutkittiin koko kotitalouden tartuntatilanne.

3.4 Mallinnuksessa käytetty SEIRD-malli

Tehdyssä agenttipohjaisessa mallinnuksessa agenttien tilaa mallinnettiin SEIRD-mallilla. Siinä ihmisten terveydentila jaettiin viiteen erilaiseen tilaan: alttiit (susceptible), altistuneet (exposed), tartunnan saaneet (infected) ja parantuneet (recovered) tai kuolleet (dead). Lähtötilanteessa kaikki ihmiset olivat taudille alttiita. Kun he kohtasivat vähintään yhden altistuneen ihmisen samassa solussa, heidän tilansa saattoi muuttua altistuneeksi riippuen COVID-19-taudin leviämistodennäköisyydestä ja R_0 arvosta (R_0 arvo kuvaa keskimäärin, kuinka monta ihmistä sairastunut ihminen voi tartuttaa joukossa, jossa ei ole immunitteettia). Kun ihmisagentti oli tarpeeksi kauan ja tarpeeksi lähellä altistunutta agenttia, hän saattoi altistua virukselle. Altistuttuaan agentti alkoi levittää tautia ja tämä vaihe kesti ihmisagentista riippuen kahdesta neljääntoista päivään. Tämän jälkeen agentti todettiin sairastuneeksi ja asetettiin karanteeniin. Karanteenissa ollessaan agentit eivät voineet levittää tautia, sillä ne eivät voineet liikkua. Sairastumisen tapahduttua agentti joko iästä riippuen tietyllä todennäköisyydellä parani 2-4 viikossa tai kuoli. Havainnollistava kuva käytetystä SEIRD-mallista on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1: Havainnollistus mallinnuksessa käytetystä SEIRD-mallista.^[2]

3.5 Mallinnuksen ajanjakso

COVID-19-taudin leviämisen tutkimiseksi tehty agenttipohjainen mallinnus sijoittui ajanjaksolle 21.2-10.5 oikeassa elämässä tapahtuneiden tapahtumien pohjalta. Koulut suljettiin 21. helmikuuta, eli opiskelijat ja opettajat siirtyivät etäkouluun. Tällöin mallinnuksessa agentit, jotka olivat opiskelijoita ja 30 % kaupungilla työskentelevistä agenteista (opettajat) siirtyivät etäopetukseen, eli ne asetettiin pysymään kodeissaan paikoillaan. Ensimmäinen altistunut henkilö saapui Urmiaan 25.2. Tällöin mallinnuksessa yhden satunnaisesti valitun ihmisagentin tila muutettiin alttiista altistuneeksi. 27.2. altistunut henkilö todettiin sairastuneeksi, jolloin mallinnuksessa kyseisen agentin tila muutettiin sairastuneeksi, ja se asetettiin karanteeniin. 28.2 toinen altistunut henkilö saapui Urmiaan, jolloin taas satunnaisesti valitun agentin tila muutettiin alttiista altistuneeksi. 2.3. kyseisen henkilön todettiin saaneen tartunta, joten mallinnuksessa sen tila muutettiin sairastuneeksi. 18-23.3. vietettiin loma-aikaa Iranissa, jolloin mallinnuksessa kaikki agentit pysyivät kotonaan. 27.3. otettiin mallinnuksessa käyttöön strategia, jonka mukaan turvavälejä (2,0 m) huomioivat agentit eivät voineet altistua tartunnalle. 31.3.-1.4. oli toinen loma-aika, jolloin agentit myös pysyivät kodeissaan. 10.5. mallinnus lopetettiin. Näiden tapahtumien ja päivämäärien mukaan toteutetun mallinnuksen tartuntamäärää verrattiin oikeassa elämässä havaittujen tartuntojen määrään. Oikean elämän tapahtumien perusteella toteutetussa mallinnuksessa 10.5. tartuntojen lukumäärä oli 1095. Tämän mallinnuksen lisäksi tehtiin kolme muuta mallinnusta, joissa tutkittiin erilaisten strategioiden vaikutusta taudin leviämiseen. Kaikki tehdyt mallinnukset toistettiin sata kertaa.

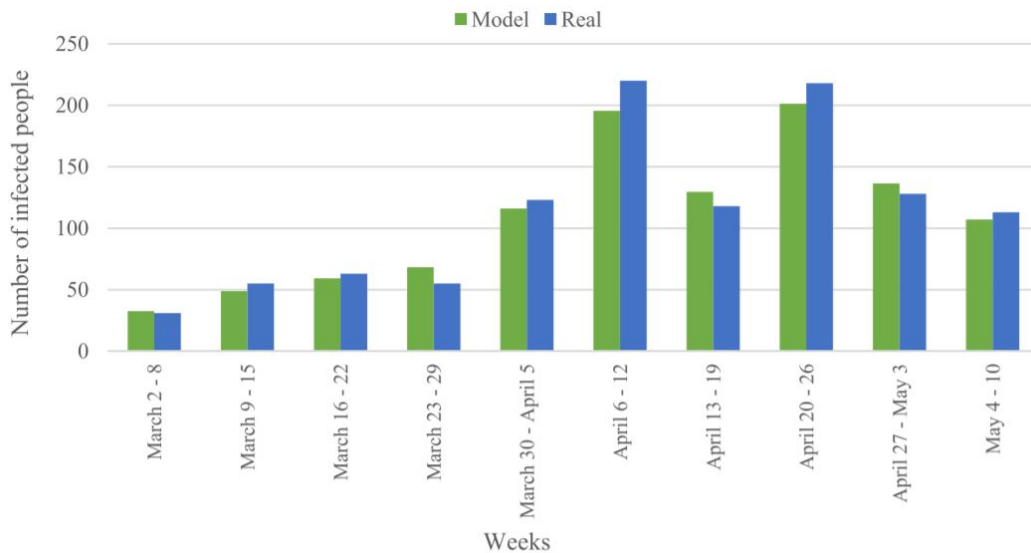
3.6 Vertailu mallinnuksen ja oikean elämän tartuntojen määrän välillä

Koska mallinnuksessa tutkittiin oikeaan elämään liittyviä tapahtumia, tutkijat vertailivat mallinnuksen avulla saatuja ennustettuja arvoja oikeasti sairastuneiden määrään. Jotta voitiin vertailla tehdyn mallinnuksen ja oikean elämän tartuntojen määrää, suorittivat tutkijat khiin neliö-testin. Khiin neliö-testin nollahypoteesi ja vaihtoehtoinen hypoteesi on määritetty yhtälössä (1) ja khiin neliö-testin arvo on määritetty yhtälön (2) avulla.

$$\begin{cases} H_0 : \text{Ennustetut arvot ovat tarpeeksi lähellä todellisia havaittuja arvoja} \\ H_A : \text{Ennustetut arvot eivät ole tarpeeksi lähellä todellisia havaittuja arvoja} \end{cases} \quad (1)$$

$$X^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)^2}{O_i} \quad (2)$$

Tässä X^2 tarkoittaa khiin neliö-testin arvoa, (P_i) keskimääräistä tartunnan saaneiden ihmisagenttien määrää, kun mallinnus toistettiin sata kertaa, (O_i) todellisten havaittujen COVID-19-tartuntojen lukumäärää ja n tarkasteltujen viikkojen määrää, joita oli yhteensä kymmenen. Khiin neliötestin tulokseksi saatiin 10,640 ja kriittiseksi arvoksi 16,919, kun vapausasteita oli yhdeksän ja merkitsevyystaso 0,05. Koska khiin neliö-testin tulos oli paljon pienempi, kuin saatu kriittinen arvo, nollahypoteesia ei voida hylätä, eli mallinnuksen avulla ennustetut arvot ovat tarpeeksi lähellä oikeita arvoja. Mallinnuksen avulla ennustetut sekä oikeasti havaitut tartuntojen lukumäärät on esitetty kuvassa 2.

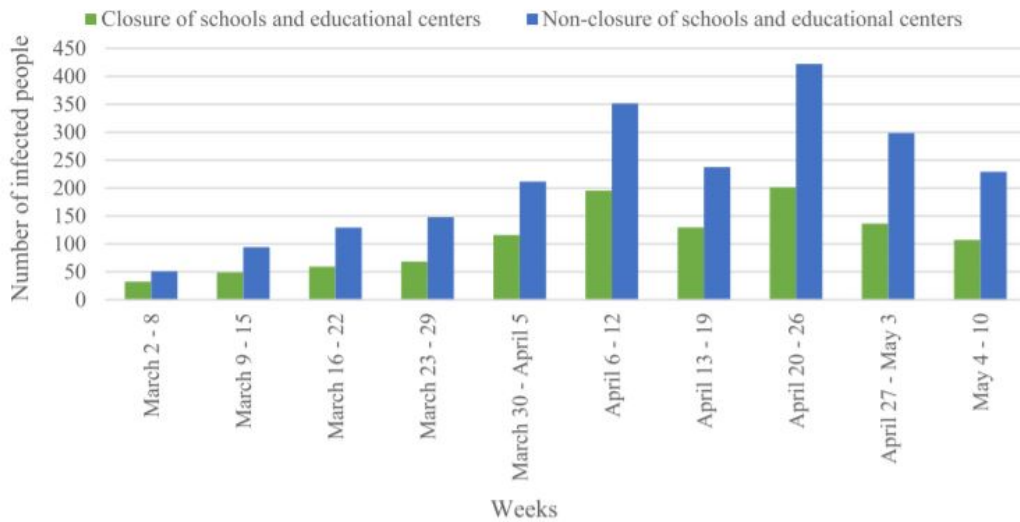


Kuva 2: Vertailu tartuntojen määrässä mallinnuksen ja oikeiden tartuntalukujen välillä, kun mallinnus suoritettiin oikean elämän tapahtumiin perustuen.^[2]

3.7 Taudin leviämisen hillitsemiseksi käytetyt strategiat

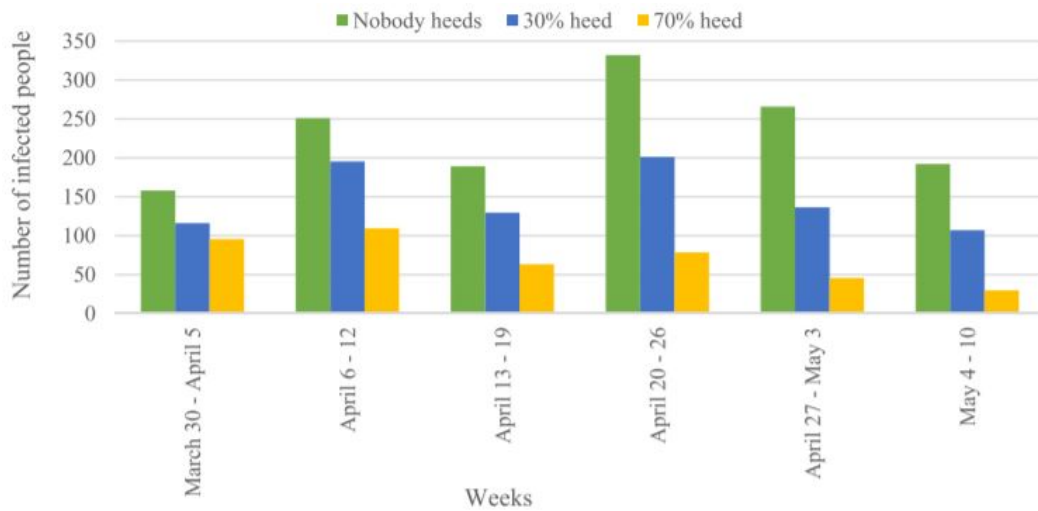
Taudin leviämisen tutkimiseen käytettiin kolmea erilaista strategiaa. Jokaisen strategian vaikutuksia tartuntojen määrään tutkittaessa toistettiin mallinnus sata kertaa, jotta voitaisiin havaita erilaisten satunnaisten tekijöiden vaikutukset lopputuloksiin. Kaikkien strategioiden tutkiminen toteutet-

tiin tekemällä kaksi tai kolme erilaista mallinnusta. Kaikki näistä tehdyistä mallinnoista etenivät kappaleessa 3.6 kuvailtujen tapahtumien mukaan, mutta osaan niistä tehtiin tiettyjä muutoksia tutkittavasta strategiasta riippuen. Tutkittaessa koulujen sulkemisen vaikutusta tartuntalukuihin suoritettiin kaksi mallinnusta, joista toisessa koulut suljettiin ja toisessa ne pysyivät avoinna. Molemmat mallinnukset kuitenkin etenivät kappaleessa 3.6 kuvatulla tavalla pois lukien koulujen sulkemiseen tai avoinna pitämiseen liittyvät vaiheet. Tutkittaessa turvavälin ja osan toimistoista sulkemisen vaikutusta tartuntalukuihin tehtiin kummastakin strategiasta kolme mallinnusta. Jokaisessa mallinnuksessa tarkasteltiin erilaista prosenttiosuutta agenteista, jotka noudattivat strategiaa. Nämä osuudet olivat 0 %, 30 % ja 70 %. Kaikissa mallinnoissa edettiin kappaleessa 3.6 kuvatulla tavalla, mutta tällä kertaa mallinnukset erosivat toisistaan turvavälien huomiointiin tai toimistojen sulkemiseen liittyvillä vaiheilla. Kaikista strategioissa saadut luvut ovat keskiarvoja sadan mallinnuksen suorittamisesta. Kun mallinnuksessa suljettiin koulut, asetettiin kaikki opiskelijat ja opettajat pysymään kodeissaan. Mallinnoita vertailemalla saadut tulokset on esitetty kuvassa 3. Diagrammista on nähtävissä, että tartuntojen määrä väheni koulujen ollessa suljettuna verrattuna mallinnoon, jossa koulut pidettiin avoinna. Koulujen ollessa suljettuna ilmenneiden tartuntojen lukumäärä oli keskimäärin 107,82 viikossa, eli 4,96 % vähemmän, kuin koulujen ollessa avoinna. Koko tutkittuna ajanjaksona uusien tartuntojen määrä oli kappaleen 3.6 tapahtumien mukaan edettäessä 1095 toisin kuin koulujen ollessa avoinna vastaava luku olisi ollut 2173.



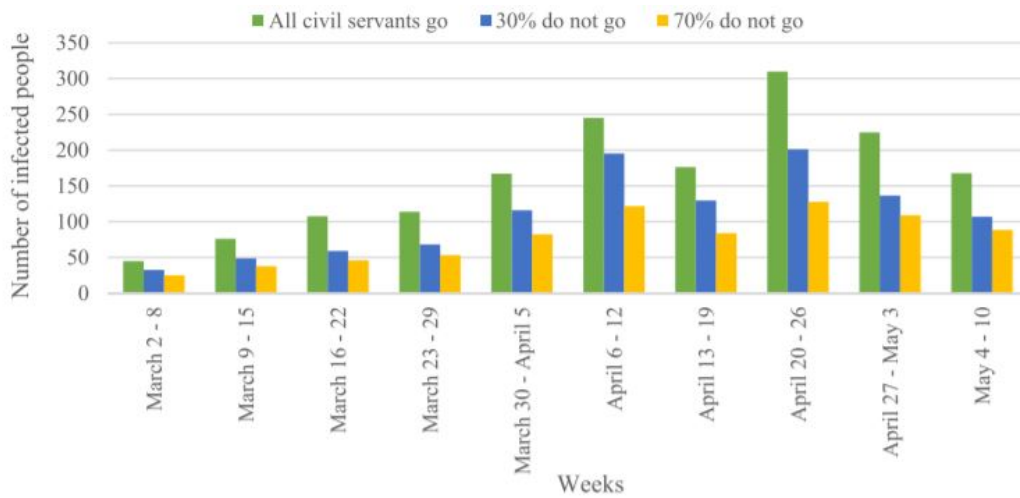
Kuva 3: Vertailu tartuntojen määrässä, kun koulut suljettiin tai ne pysyivät auki.^[2]

Kun mallinnuksessa tarkasteltiin turvavälien vaikutusta taudin leviämiseen, valittiin satunnaisesti ihmisagentit, joista koostui haluttu prosenttiluku. Mallinnuksessa tutkittiin, millainen vaikutus turvavälien pidolla oli, kun turvavälejä noudattivat 0%, 30 % ja 70 % ihmisagenteista. Turvavälien toteuttaminen mallinnuksessa perustui solujen kokoon. Ihmisagentit, jotka huomioivat turvavälit eivät olleet samassa 2,0 m x 2,0 m:n solussa toisten ihmisagenttien kanssa. Tällöin ne eivät voineet altistua taudille. Kuvassa 4 on esitetty kyseisen strategian avulla saadut tulokset. Tuloksiksi saatiin, että kun 30 % agenteista huomioi turvavälit, tartuntaluvut pienenevät keskimäärin 83,8 eli 5,24 % viikossa ja 70 % huomioidessa turvavälit tartuntamäärät pienenevät keskimäärin 160,97 eli 10,07 % verrattuna mallinnukseen, jossa kukaan agenteista ei huomioinut turvavälejä. Kokonaisuutena 30 %:n huomioidessa turvavälit tartuntojen määrä väheni 502,8:lla ja 70 %:n huomioidessa turvavälit tartuntojen määrä väheni 965,83:lla. Jos yksikään ihmisagenteista ei olisi huomioinut turvavälejä, olisi tartuntamäärä ollut 1598 1095:n tartunnan sijaan.



Kuva 4: Vertailu tartuntojen määrässä, kun 0 %, 30 % tai 70 % ihmisagenteista huomioi turvavälit muihin agentteihin.^[2]

Kun mallinnuksessa tarkasteltiin toimistojen sulkemisen vaikutusta tartuntalukuihin, myös tässä strategiassa tutkittiin, millainen vaikutus sillä oli taudin leviämiseen, kun 0%, 30 % tai 70 % toimistoissa työskentelevistä ihmisagenteista ei mennyt töihin, vaan ne pysyivät kodeissaan. Kuvassa 5 on esitetty kyseisen strategian avulla uusien tartuntojen määrät viikkoa kohden, kun tietty osa toimistoissa työskentelevistä ihmisagenteista ei mennyt töihin. Kun 30 % toimistoissa työskentelevistä ihmisagenteista ei mennyt töihin pieneni uusien tartuntojen keskimääräinen lukumäärä viikkoa kohti 33,89 tartunnalla eli 3,30 prosentilla verrattuna tartuntamäärään, joka aiheutui kaikkien toimistoissa työskentelevien agenttien käydessä töissä. Kun 70 % toimistoissa työskentelevistä agenteista ei mennyt töihin, olivat vastaavat luvut 85,76 ja 5,25 %. Kokonaisuutena 30 % ja 70 % toimistoissa työskentelevistä ihmisagenteista jäädessä kotiin tartuntojen lukumäärät olivat 538,91 eli 32,98 % ja 857,61 eli 52,48 % pienemmät, kuin jos kaikki toimistoissa työskennelleet agentit olisivat käyneet töissä. Jos kaikki toimistot olisivat olleet avoinna, olisi tartuntaluku ollut 1095:n sijaan 1634.



Kuva 5: Vertailu tartuntojen määrässä, kun 0%, 30 % tai 70 % toimistoissa työskentelevistä ihmisagenteista ei mennyt töihin.^[2]

Esitetyissä kuvissa on huomioitava, etteivät kolmen eri strategian avulla saadut lopputulokset ole vertailukelpoisia keskenään, sillä ne on käynnistetty eri vaiheessa mallinnusta. Tällöin lähtötilanne on voinut olla eri jokaisen strategian käynnistämisen alussa.

3.8 Mallinnuksen lopputulokset

Vertailtaessa oikeasti havaittuja tartuntalukuja agenttipohjaisen mallinnuksen avulla ennustettuihin lukuihin ovat saadut luvut suhteellisen yhtäpitäviä. Koska agenttipohjainen mallinnus on kuitenkin karkea yksinkertaistus oikeasta elämästä, eivät sen avulla ennustetut arvot ole täysin yhteneviä oikeasti havaittujen tartuntamäärien kanssa. Oikeassa elämässä kaikkiin asioihin vaikuttava tekijät ovat hyvin monimutkaisia, joten kaikkia niitä ei voida mallinnuksessa huomioida. Jos mallinnuksessa haluttaisiin ottaa huomioon kaikki tapahtumiin mahdollisesti vaikuttavat parametrit, olisi järkevää vain tarkastella oikeaa elämää monimutkaisen mallinnuksen rakentamisen sijaan. Oikeassa elämässä esimerkiksi kaikki sairastuneet ihmiset eivät välttämättä hakeudu testattaviksi, he ovat voineet saada tartunnan toisessa kaupungissa, jossa tartunta rekisteröitiin tai uusien tartuntatapausten tutkiminen saattaa viivästyä, jolloin saadut viikoittaiset arvot eivät välttämättä pidä täysin paikkaansa. Tutkittaessa taudin leviämisen hidastamista eri strategioita käyttäen oli kaikista tehokkain keino huomioida turvavälit agenttien välillä. Tehtyjen mallinnuksien avulla on saatu arvokasta tietoa, millaisia toimia olisi tehtävä taudin leviämisen hidastamiseksi ja estämiseksi. Niiden avulla

päätäjät ovat voineet tehdä päätöksiä, millaisiin toimiin kannattaisi ryhtyä COVID-19-taudin hillitsemiseksi. Esimerkiksi turvavälien noudattamista ovat suositelleet useat maat.

4 Yhteenveto

Tutkielmassani esittelin agenttipohjaista mallinnusta sekä sen hyödyntämistä COVID-19-taudin leviämisen tutkimisessa. Agenttipohjaisesta mallinnuksesta kerroin perustietoja, vahvuuksia ja heikkouksia. Tämän jälkeen siirryttiin osioon, jossa käsiteltiin agenttipohjaisen mallintamisen käyttöä COVID-19-taudin leviämisen tutkimisessa. Tähän liittyen kerroin mallinnuksessa käytetystä ympäristöstä ja agenteista ominaisuuksineen. Lisäksi toin esiin aikajanan, jota mallinnus noudatti, taudin leviämisen estämiseksi käytetyt strategiat ja mallinnukset lopputulokset.

Mallinnuksen avulla ennustetut tartuntaluvut olivat suhteellisen lähellä oikeasti havaittuja tartuntalukuja. Vaikka luvut hieman erosivatkin, noudattivat oikeasti havaitut ja mallinnuksen avulla saadut tartuntaluvut samaa trendiä. Lisäksi tutkittujen strategioiden avulla kaikista eniten tartuntalukuja vähensi turvaväleistä huolehtiminen.

Tutkielmaani olisi voinut laajentaa tarkastelemalla useampia tutkimuksia aiheeseen liittyen, jolloin myös esimerkiksi kasvomaskien käytön ja rokotteen keksimisen vaikutukset olisi voitu huomioida. Lisäksi mallinnusta olisi voitu tarkastella laajemmalla alueella, kuin yhdessä kaupungissa esimerkiksi tutkimalla, miten lentoliikenne tai sen pysäyttäminen vaikuttaisi taudin leviämiseen koko maapallolla.

Lähdeluettelo

- [1] U. Wilensky, W. Rand: *An Introduction to Agent-Based Modeling; Modeling Natural, Social and Engineered Complex Systems with Netlogo*, 2015. (sivut 1-38)
- [2] N. M. Gharakhanlou, N. Hooshangi: *Spatio-Temporal Simulation of the Novel Coronavirus (COVID-19) Outbreak Using the Agent-Based Modeling Approach (Case Study: Urmia, Iran)*, 2020.