

**ENSIHOITO: AMBULANSSIEN KIINTEIDEN SIJOITUSPAIKKOJEN
OPTIMOINTITEHTÄVÄN MALLINNUS**

Jarmo Heinonen

Pro gradu -tutkielma

Tammikuu 2011

TURUN YLIOPISTO
MATEMATIIKAN LAITOS
20014 TURKU

TURUN YLIOPISTO

Matematiikan laitos

HEINONEN, Jarmo:

Ensihoito: ambulanssien kiinteiden sijoituspaikkojen optimointitehtävän mallinnus

Pro gradu -tutkielma, 40 s., 15 liites.

Sovellettu matematiikka

Tammikuu 2011

Kun ihminen joutuu onnettomuuteen tai sairastuu vakavasti, toivoo hän saavansa luotettavan hoidon riittävän nopeasti. Ensihoito pyrkii tarjoamaan tämän palvelun.

Työssä aloitetaan tutkimusta ensihoidon mallinnuksesta ja autetaan vastauksen saamisessa kysymykseen, kuinka monta prosenttia sairaanhoitopiirin kullakin alueella asuvista ihmisistä tavoitetaan määrääjassa. Pohjustusta tämän määrittämiseen on tässä pro gradu -työssä tehty laatimalla optimointimalli ensihoidon ambulanssien kiinteille sijoituspaikoille. Mallin avulla kyetään arvioimaan ambulanssien saavutettavuudeltaan ja kustannuksiltaan optimaalisia kiinteitä sijoituspaikkoja. Tuloksena saadaan tietyllä tavoittamisviiveellä Pareto-tehokas ratkaisu palvelutason ja kustannusten suhteen.

Tässä työssä selvitetään mallinnuksen matemaattista pohjaa eivätkä reaaliset parametrit ole vielä olennaisen tärkeässä osassa. Esimerkiksi tieverkosto ei ole mukana ja keliominaisuudet on mallinnettu yksinkertaisella kertoimella. Prototyypimallia voidaan jatkossa muunnella muihin vastaavanlaisiin ongelmiin sekä tarkentaa ottamalla mukaan reaalisia karttapohjia ja keli- ym. olosuhteita.

Valtakunnallisesti ollaan ehdottamassa siirtymistä pienemmistä ensihoidon sopimusalueista pinta-alaltaan ja väestömäärältään laajemman asiakaskannan kattaviin, esimerkiksi sairaanhoitopiirikohtaisiin, palvelualueisiin. Tämä uudistus tarjoaa mahdollisuuden suunnitella ambulanssien määrät ja sijoituspaikat uudelleen, jotta saavutetaan mahdollisimman hyvä tasapaino sekä kustannusten että palvelun peiton osalta. Työssä kehitetty ensihoidon optimointiin käytettävä matemaattinen malli toimii lähtökohtana reaaliselle optimaalisen kustannusten ja palvelun peiton tuottavalle ambulanssien sijoituspaikkojen ratkaisulle. Tässä Pareto-optimaalisessa tilanteessa kumpaakaan parametreista – kustannusta tai palveluprosenttia - ei voida parantaa huonontamatta toista.

Asiasanat: ensihoito, matemaattiset mallit, matemaattinen optimointi, paikkatietojärjestelmät

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1. Taustaa työlle	1
1.2. Työn tarkoitus	2
1.3. Ensihoidosta.....	2
1.4. Muutamia selvityksiä terveydenhuollon simulaatioista.....	4
1.5. Mallinnuksen ja optimoinnin tietolähteet	5
2. TYÖN MÄÄRITTELY JA TAVOITTEET	6
2.1. Työn määrittely	6
2.2. Haasteet.....	6
3. MALLINNUKSESTA	7
3.1. Mallintamisesta yleisesti.....	7
3.2. Monitavoiteoptimoinnista.....	7
4. OHJELMISTO	10
4.1. Ratkaisuohjelmisto.....	10
4.2. Optimointimenetelmät	10
4.3. Ohjelmiston mallille antamat mahdollisuudet ja rajoitukset	11
5. ENSIHOIDON OPTIMOINTIMALLINNUS	12
5.1. Mallin syöttötiedot ja tulosten esittäminen	12
5.2. Ensihoidon malli	13
5.3. Indeksointi	14
5.4. Parametrit.....	15
5.5. Päätösmuuttujat.....	18
5.6. Malliyhtälöt: Kohdefunktiot ja rajoitteet	18
5.6.1 Tason I malliyhtälöt: kohdefunktiot ja rajoitteet.....	18
5.6.2 Tason II malliyhtälöt: kohdefunktiot ja rajoitteet	19
5.6.3 Tason III malliyhtälöt: kohdefunktiot ja rajoitteet	20
5.6.3.1 Tason III ensimmäinen vaihe/kierros: kohdefunktiot ja rajoitteet	21
5.6.3.2 Tason III toinen vaihe/kierros: kohdefunktiot ja rajoitteet	23
5.6.3.3 Kustannuslaskennasta	24
5.7. Mallin antamat tulokset	25
5.8. Mallin tarkka kuvaus	26
6. MALLINNUSAJOT	27
6.1. Taustaa mallinnusajoille.....	27
6.2. Mallinnusajo 1	27
6.3. Mallinnusajo 2 – saaristo ja helikopterit.....	30
7. JOHTOPÄÄTÖKSET.....	35
LÄHTEET	37

LIITTEET

- Liite 1 Ensihoitomallinnus: mallin GAMS-ohjelman listaus
- Liite 2 Ensimmäisen ensihoitoesimerkin sivuja tiedostosta ensihoito20.xls
- Liite 3 Toisen ensihoitoesimerkin sivuja tiedostosta ensihoito20_heli.xls

1. JOHDANTO

1.1. Taustaa työlle

Kun ihminen joutuu onnettomuuteen tai sairastuu vakavasti, toivoo hän saavansa luotettavan hoidon riittävän nopeasti. Ensihoito pyrkii tarjoamaan tämän palvelun. Ensihoito voidaan määritellä seuraavasti: ensihoito on sairastuneen tai vammautuneen potilaan elintoimintojen käynnistämiseksi, ylläpitämiseksi tai terveydentilan parantamiseksi antamaa välitöntä hoitoa, jonka antaa asianmukaisen koulutuksen saanut henkilö [28].

Tämä työ sai alkunsa ensihoidon selvitystyöstä, joka on käynnissä Varsinais-Suomen alueella. Selvitystyö on nimeltään Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin ensihoitopalvelun kokonaisuudistuksen suunnittelu (VEKSU) -projekti [28]. Projektin tavoitteena on kartoittaa ensihoitopalvelun osalta Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin alueen riskit, sen jälkeen laatia palvelutasomääritykset ja valmiussuunnitelma. Suunnitelman tulisi olla uusi eikä perustua vanhaan kuntalähtöiseen ratkaisuun.

Projektin taustaa voidaan hahmottaa tutustumalla Jukka Pappisen elävään kuvaukseen alueellisen ratkaisun tarpeellisuudesta ensihoidon järjestämisessä. Askeleena eteenpäin on sopia ensihoidon järjestämisestä nykyistä suuremmissa yksiköissä eli esimerkiksi sairaanhoitopiirin tasolla nykyisen kuntatason sijasta. Kuitenkin järjestämisen ohjenuorana tarvitaan palvelutasopäätös siitä, minkälaiseen palveluun pyritään ja mitä toteutettavalta ratkaisulta vaaditaan esimerkiksi palvelun viiveen ja hoidon tason suhteen [20].

Kun katsotaan ensihoidon järjestämistä laajemmalla alueella, tulee mahdolliseksi miettiä ensihoidon asemapaikkojen sijainnit ja niiden ambulanssimäärät uudelleen kokonaisuutena. Asemapaikkojen sijoitukseen ja määrään vaikuttavat esimerkiksi palvelutasovaatimuksista aika, jossa apua on saatavilla. Koska joka paikkaan ei ole yhtä hyvät liikenneyhteydet ja asukkaiden määrä sekä vahinkoriskit vaihtelevat myös alueittain, lienee syytä valita parhaimman palvelupeiton antamat sijoituspaikat. Tätä valintaa varjostaa tarve kustannusten pitämisestä kohtuullisina tai ainakin maksukyvyyn mahdollisuuksien rajalla.

1.2. Työn tarkoitus

Työn tarkoituksena on aloittaa tutkimus ensihoidon matemaattisesta mallinnuksesta ja auttaa vastauksen saamisessa VEKSU-projektin osatavoitteena olevaan palveluvasteen määrittelyyn [29]. Siinä tuli määrittellä, kuinka monta prosenttia sairaanhoitopiirin kullakin alueella asuvista ihmisistä tavoitetaan määräajassa. Pohjustusta tämän määrittämiseen on tässä pro gradu -työssä tehty laatimalla optimointimalli ensihoidon ambulanssien kiinteille sijoituspaikoille.

Matemaattinen malli on systeemin kuvaus matematiikan kielellä. Tässä työssä selvitetään mallinnuksen matemaattista pohjaa ja reaaliset parametrit eivät ole vielä olennaisen tärkeässä osassa. Esimerkiksi tieverkosto ei ole mukana ja keliominaisuudetkin on mallinnettu yksinkertaisella kertoimella. Eri maantieteellisissä lohkoissa - ruuduissa – käytetään niille erikseen ominaisia riski- ja väkilukukertoimia. Ambulansseille määritellään tietyt ominaisuudet omilla kertoimilla. Pohjakarttaa mallittava ruudukko on valmiiksi syötetty sisältäen etäisyydet/saavutettavuusajat ambulanssien sijoituspaikkojen optimointia varten. Paikkatietojen käytöstä palo- ja pelastustoimintaa varten tehdyssä pro gradu -työssä on jo vuonna 1997 esitetty jatkotutkimuksena sairaankuljetusyksiköiden sijoittelun tekemistä paikkatietojärjestelmiä apuna käyttäen [14].

Edelleen Antti Castrénin diplomityössä tuodaan esille mahdollisuuksia tuottaa lähtötiedot ensihoitomallille. Esimerkiksi ruutupohja asukastietoineen on saatavissa tilastokeskukselta. Saavutettavuusajan oleellisin muuttuja eli ajoaika voidaan tällöin laskea paikkatieto-ohjelmistojen verkkoanalyysityökaluilla [2].

1.3. Ensihoidosta

Ensivaste ja ensihoito voivat termeinä sekoittua. Käytännössä ensivasteyksiköllä tarkoitetaan hätäkeskuksen hälytettävissä olevaa muuta ajoneuvoa kuin ambulanssia, kuten esimerkiksi paloautoa, joka tavoittaa hätätilapotilaan nopeammin kuin lähin ambulanssi [10, s. 19]. Toisin sanottuna ensivasteyksikkö on hätäapuyksikkö, joka kykenee saavuttamaan avun tarvitsijan ensimmäisenä ja pystyy antamaan ensiavun. Palvelujärjestelmää, joka tuottaa nämä mainitut ambulanssi- ja ensivastepalvelut, kutsutaan hallituksen esityksen mukaan ensihoitopalveluksi [10, s. 77].

Ensihoitopalvelu on moniportainen järjestelmä: siihen kuuluu yksiköt lähtien ensivasteesta perustasoisen ja hoitotasoisien sairaankuljetuksen sisältäen lääkäriyksikköön saakka (esimerkiksi lääkärihelikopteri). Tämän palvelun, avuntuonnin ja sairaankuljetuksen, järjestämisvastuu on aina terveyskeskuksilla ja tulevaisuudessa, mikäli lakiehdotus menee läpi, se olisi sairaanhoitopiireillä (keskussairaaloilla) [10]. Terveyskeskukset ovat tehneet sopimuksia käytännön toiminnasta esimerkiksi pelastustoimen tai yksityisten yrittäjien kanssa. Esimerkkinä Varsinais-Suomen aluepelastuslaitoksen osallistumisesta sairaankuljetukseen löytyvät tiedot kyseisen organisaation sivuilta [26].

Pelastuslaitos voi siis osallistua ensivastetoimintaan – ensihoidon kiireisimmän luokan toimintaan – sopimusten puitteissa. Toiminnan taso ja laajuus perustuu terveystoiminnan palvelutason määritykseen ja pelastustoiminnan riskialuekartoitukseen. Toiminnan maksaa kuitenkin terveystoimi [27, s. 14]. Ensivasteessa, kuten palotoimessa, on pikainen toiminta ja nopea saavutettavuus oleellista avun tarvitsijan kannalta. Varsinais-Suomen pelastuslaitoksen palvelutasopäätöksessä pelastustoiminnan toimintavalmiusajat on määritelty riskialuejaon perusteella [27].

Ensihoitopalvelun järjestämistä on pohdittu useilla alueilla ympäri Suomea. Pelastuslaitoksen osallistumista ensivastetoimintaan on mietitty esimerkiksi Kuopion alueella Päivystys 2008 -kongressissa, jossa esitettiin toimintamalleja ja kustannuksia ensivastetoimintatilanteissa [11].

Ensihoitoa ja sairaankuljetusta Pohjois-Karjalassa on selvitetty Sami Arolan toimesta vuonna 2007. Tässä selvityksessä on esitetty Suomen porrastettu ensihoitojärjestelmän toteutus Pohjois-Karjalassa [1, s. 16–17]. Myös hätäkeskusten vastaanottamien tehtävien luokitus A – D kuvataan ja esitetään tilastollista tietoa tehtävien määrästä vuodessa asukasta kohden. Raportissa on esitetty saavutettavuusaikoja ja ehdotettu toimintamalleja tilanteen selkeyttämiseksi. Tässäkin on ensimmäisenä esillä ensihoidon järjestämisen vastuun siirtäminen kunnilta sairaanhoitopiirille [1].

Palo- ja pelastustoimen saavutettavuusaikoja karttapohjan, tiestön kunnan ja ruuhkien ym. pohjalta on Veli-Pekka Ihamäki pohtinut pro gradu –työssään [14]. Työn alkuperäisenä tavoitteena oli selvittää, miten onnistuneita ja paikkansapitäviä palo- ja pelastustoimen yhteistyöraajat ovat. Siinä on myös käyty läpi merkittävä määrä

sijoitteluun, riskianalyysiin ja mallinnukseen paneutuneita lähteitä. Työssä ei ollut rakennettu simulointiin tai optimointiin mallia, jolla olisi voinut arvioida nykytilannetta saatikka laatia ehdotuksia tilanteen parantamiseksi. Arvioinnissa verrattiin paikkatietojen avulla laskettuja saavutettavuusaikoja ja verrattiin saavutettavuusaikoja edelleen yhteistoimintarajoihin.

Pauli Kamsula pohtii paikkatietojen käyttöä ratkottaessa ensihoitopalvelun suunnittelua, sen riskikartoitusta ja sijoittelun ongelmaa seminaariesitelmässään ”Paikkatietojen käyttö ensihoitopalvelujen suunnittelussa”. Esitelmässä hän on keskittynyt Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin alueelle [15].

1.4. Muutamia selvityksiä terveydenhuollon simulaatioista

Jukka Pappisen selvityksessä ”Ensihoitopalvelun mallintaminen Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin alueella 19.11.2009” on määritetty nykyisiä palveluaikoja teoreettisessa optimitalanteessa [21, s. 10]. Koska erilaiset maantieteelliset asemat ovat eritasoisten liikenneyhteyksien päässä ja eri alueilla onnettomuusriski on erilainen, voidaan pyrkiä luokittelemaan alueita niiden väestömäärän ja riskikertoimien avulla. Maantieteellisten alueiden jakaminen riskiluokkiin niin, että samaa palvelutasoa (100 %:n palvelupeattoa) ei määritellä kaikille, vaan osa asiakkaista, esimerkiksi 80 % saa palvelun lyhyemmässä ajassa kuin muut, on reaali maailman mahdollinen ratkaisu [21, s. 14]. Pappinen toteaa asemapaikkojen tarkan määrittelyn olevan mahdollista siinä vaiheessa, kun palvelutasovaatimuksista on ensin sovittu [21, s. 18].

Simuloinnin ja mallinnuksen käytön on todettu olevan vähäistä Suomen terveydenhuollossa. Aihetta on käsitelty TE-keskuksen teettämässä selvityksessä, jossa on hyvin seikkaperäisesti selostettu simuloinnin ja mallinnuksen käsitteitä sekä sovelluskohteita [22].

Reaali maailman simulointimallit syöttötietoineen voivat vaikuttaa tietomäärältään kovin isoilta josta esimerkkinä Toni Ruohosen lisensiaattityössä esitetty laaja ensiapupoliklinikan simulointimalli [25]. Lisensiaattityössä on käytetty terveydenhuollon mallintamiseen tarkoitettua MedModel-ohjelmistoa.

1.5. Mallinnuksen ja optimoinnin tietolähteet

Matemaattiseen mallinnukseen on tutustuttu hyvin selkeän ja seikkaperäisen M. Huovisen lauttaliikenteestä laaditun pro gradu -työn avulla [13]. Työn arvoa kuvaa esimerkiksi se, että sitä on käytetty matematiikan laitoksen mallinnusprojektiurssin SATAMA-projektissa tietolähteenä [12]. Huovisen pro gradu -työhön on koottu todella kattavasti mallinnukseen liittyvää termistöä ja siinä on monipuolisesti kuvattu mallinnusta ja optimointimenetelmiä. Huovinen tuo esille myös reaali maailman mallinnuksen rajoitteet: mallista tulee helposti monimutkainen siitä huolimatta, että se kuvaa vain pientä osaa reaali maailmasta. Laaja malli voi kuormittaa myös laitteistoa. Tällaisessa tapauksessa mallia tulee yksinkertaistaa laskennan mahdollistamiseksi. Joka tapauksessa vaikka malli olisikin kattava, niin oleellista on löytää ja saada oikeat arvot parametreille ja lähtötiedoille.

Optimointimenetelmiin on perehdytty tutustumalla matemaattinen optimointi I ja II -kurssien luentomonisteisiin [16], [17]. Monitavoiteoptimointiin erityisesti sekä Pareto-optimaalisuuden ominaisuuksiin on tutustuttu Kaisa Miettisen Optimointi -luentomonisteen [18] ja Matthias Ehrgottin Multicriteria Optimization -teoksen [5] avulla. Edellä mainitut matemaattisen optimoinnin I ja II -luentomonisteet pohjautuvat tässä työssä käytettävien optimointimenetelmien osalta R. Rardinin teokseen: Optimization in Operations Research [23]. Kyseisen teoksen esityksiä minimipeittomallin ja maksimipeittoprosentin simulointimalleista on käytetty pohjana tämän työn ensihoitomallissa. Tätä ensihoitomallia käsitellään tarkemmin luvussa 5.

2. TYÖN MÄÄRITTELY JA TAVOITTEET

2.1. Työn määrittely

Mallin avulla tulee kyetä arvioimaan ambulanssien saavutettavuudeltaan ja kustannuksiltaan optimaalisia kiinteitä sijoituspaikkoja. Tavoitteena on siten luoda prototyypimalli ohjelmasta, jota voidaan muunnella vastaavanlaisiin ongelmiin sekä tarkentaa ottamalla mukaan reaalisia karttapohjia ja keli- ym. olosuhteita. Tuloksena saadaan tietyllä tavoittamisviiveellä Pareto-optimaalinen (katso myös luku 3) ratkaisu palvelutason ja kustannusten suhteen [18, s. 107]. Koska saatu ratkaisu on Pareto-optimaalinen, ei kustannuksia eikä palvelutasoa voida parantaa heikentämättä toista näistä komponenteista.

2.2. Haasteet

Mallin tarvitsemia lähtötietoja ovat esimerkiksi karttapohja ja sen pohjalta lasketut saavutettavuusajat. Näiden tietojen pohjalta rakennetaan ruutujakoinen malli, joka toteutetaan ratkaisijaohjelmistoja sisältävällä mallinnusohjelmistolla. Näiden ohjelmistojen ominaisuudet ja algoritmit antavat mahdollisuuden luoda haasteellisen ohjelmointiympäristön. Esitettävällä lineaarisella sekalukumallilla optimointilaskennat suppenevat ja tulokset saadaan havainnolliseen muotoon Excel-ohjelmistolla.

Kustannuslaskennan mukaanotto ja kustannusten optimointi saavutettavuusaikojen ja palvelupeittoprosentin funktiona tuo uuden selvän haasteen laskentarutiinien, kohdefunktion ja malliyhtälöiden muodostamiselle. Eri muuttujien ja parametrien riippuvuuksien sekä painokertoimien löytäminen ja sovittaminen tähän ongelmaan ja malliin on tuomassa mielenkiintoa tehtävän ratkaisuun.

3. MALLINNUKSESTA

Tässä luvussa esitetään lyhyesti ja kootusti mallinnuksen perusteita sekä hieman laajemmin mallinnettavan ensihoidon useiden ristiriitaisten tavoitteiden ratkaisemisessa tarvittavaa monitavoiteoptimointia (luku 3.2). Monitavoiteoptimoinnissa tulee keskeisenä esille ratkaisun Pareto-optimaalisuus, mitä selvitetään myös tarkemmin luvussa 3.2.

3.1. Mallintamisesta yleisesti

Matemaattinen malli, joka on kokoelma muuttujia ja riippuvuuksia, tarvitaan kuvaamaan toiminnallisen operaatio-ongelman olennaisia ominaisuuksia [23, s. 1]. Optimointimallit taasen esittävät ongelman vaihtoehdot päätösmuuttujina ja etsivät arvoja kohdefunktion minimoimiseksi tai maksimoimiseksi näiden päätösmuuttujien funktiona. Päätösmuuttujien arvot saavat vain tiettyjä arvoja rajoitteiden antamissa rajoissa.

Hyvänä kokoavana lähteenä mallinnukseen ja optimointimalleihin on Huovisen pro gradu -työ [13]. Oleellisimmat optimointimallin osat ovat parametrit, päätösmuuttujat, rajoitukset sekä kohdefunktio(t). Parametrien arvot tai jakaumat ovat tunnettuja. Päätösmuuttujien arvoja ei optimointia aloitettaessa tunneta, koska ne mallintavat tulevia päätöksiä ja niiden arvot syntyvät vasta optimoinnin tuloksena. Rajoitukset ovat päätösmuuttujien ja parametrien välisiä relaatioita ja asettavat siis ehtoja päätösmuuttujien ja parametrien suhteille. Kohdefunktio on päätösmuuttujien funktio, jolla mitataan päätöskriteerien saamia arvoja [13, s. 11].

Optimoinnissa pyritään löytämään mallia käyttämällä optimiratkaisu. Se on kaikista mahdollisista päätösmuuttujien arvoista muodostuva kokoelma, jolla kohdefunktio saavuttaa vähintään yhtä hyvän arvon kuin millä tahansa ratkaisulla, joka täyttää kaikki rajoitukset [23, s. 33].

3.2. Monitavoiteoptimoinnista

Kun ratkaistavassa tehtävässä on useita tavoitteita, ovat nämä tavoitteet useasti myös keskenään ristiriitaisia. Esimerkiksi, jos halutaan päästä mahdollisimman nopeasti

matkustamaan maasta toiseen, nousevat matkakustannukset joko vaikkapa nopeutta lisättäessä syntyvän suuremman polttoaineen kulutuksen takia tai käytettäessä matkavälineenä kallista lentokonetta edullisemman, mutta hitaamman, laivan sijasta. Tällainen tehtävän asettelu muodostaa monitavoiteoptimoinnin ongelman, jonka ratkaisemiseksi yksitavoitteisen ongelman ratkaisukeinot eivät riitä [18, s. 108].

Monitavoiteoptimoinnissa ratkaisun optimaalisuuden käsite määritellään Pareto-optimaalisuus -käsitteen avulla. Usean komponentin (esimerkiksi matka-aika ja matkakustannukset) muodostama ratkaisu on Pareto-optimaalinen (tai tehokas), jos yhtäkään ratkaisun komponenttia ei voida parantaa huonontamatta jotakin toista komponenttia [18, s. 109], [5, s. 23 – 24]. Mikäli yhdenkin komponentin arvo voi parantua tai huonontua ilman, että muut komponentit heikentyvät parhaasta arvostaan, on ratkaisu heikosti Pareto-optimaalinen [18, s. 109], [5, s. 38].

Monitavoiteoptimointitehtäviä ratkaistaan pääasiassa muokkaamalla tehtävä yksitavoitteiseksi [18, s. 110]. Menetelmiä muokkaamiseen on useita, joista esimerkkeinä seuraavassa luetellaan Pareto-optimaalisten pisteiden määräämismenetelmiä: painokerroinmenetelmä, rajoiteyhtälömenetelmä, painotetun metriikan menetelmät ja saavutusfunktio. Rajoiteyhtälömenetelmä (ϵ -Constraint Method) [18, s. 112 – 117] on ehkä toinen tunnetuimmista monitavoiteoptimointitehtävien ratkaisumenetelmistä painokerroinmenetelmän ohella [5, s. 98]. Helposti ymmärrettävää rajoiteyhtälömenetelmää käsitellään seuraavassa tarkemmin.

Rajoiteyhtälömenetelmässä yksi tavoitteista valitaan optimoitavaksi kohdefunktioksi. Muista tavoitteista muodostetaan rajoiteyhtälöitä. Rajoitteilla vaaditaan näiden muiden tavoitteiden täyttyvän vähintään tietyllä tasolla. Aiemman esimerkin mukaan voidaan minimoida matkakustannuksia, sillä ehdolla, että matka-aika ei nouse esimerkiksi 10 tuntia pitemmäksi. Mikä tahansa tavoitteista voidaan valita optimoitavaksi ja muut jäävät silloin rajoiteyhtälöiden avulla mukaan otettaviksi tehtävän ratkaisussa [5, s. 98]. Rajoiteyhtälömenetelmällä saatu ratkaisu on aina vähintään heikosti Pareto-optimaalinen ja mikäli ratkaisu on lisäksi yksikäsitteinen, niin saatu ratkaisu on Pareto-optimaalinen [18, s. 115], [5, s. 99 – 100]. Kahden komponentin (tavoitteen) tapauksessa optimaalisia ratkaisupisteitä voidaan havainnollistaa graafisesti. Kun merkitään minimoitavien kohdefunktioiden arvot kaksiulotteiseen koordinaatistoon,

ovat pisteet Pareto-optimaalisia, mikäli yhtään ratkaisun pistettä ei ole yhdestäkään niistä ”lännen-etelän” – välisessä suunnassa [16, s. 90 – 91].

Mikäli jonkun tavoitteen arvot ovat tunnetussa joukossa (esimerkiksi palvelupeitto voi vaihdella 0 %:n ja 100 %:n välillä), on sopivien rajoitteiden valitseminen helpompaa kuin tuntemattoman arvojoukon ollessa kyseessä. Tällöin voidaan kohdefunktio optimoida useilla rajoitteen arvoilla ja näin saada Pareto-optimaalisten pisteiden joukko, jotka yhdistämällä graafisesti saadaan Pareto-käyrä [23, s. 382].

4. OHJELMISTO

Optimointiohjelmistoksi valittiin mallinnusohjelmisto GAMS, josta tekijällä oli kokemusta mallinnusprojektin puitteissa [12]. The General Algebraic Modeling System (GAMS) on matemaattisten mallien ja optimoinnin korkean tason mallinnusympäristö [9]. Ohjelmisto sisältää kääntäjän ja useamman integroidun ratkaisijaohjelmiston. Tässä työssä ratkaisijana käytetään Cplex-ohjelmistoa, joka on käyttäjän kannalta integroitu GAMS-ohjelmistoon [7].

4.1. Ratkaisuohjelmisto

GAMS on erityisesti kehitetty mallittamaan lineaarisia, epälineaarisia ja sekalukutehtäviä. Se toimii myös henkilökohtaisissa tietokoneissa Windows-ympäristössä, jota käytettiin tässä työssä. Ohjelmisto on osoittautunut selkeäksi ja itseohjaavaksi ympäristöksi. GAMS-ympäristön toimesta tapahtuva ohjelmointivirheiden tarkastus tekee mallin tuottamisesta luotettavaa. Rakenne tukee dokumentointia, sillä kaikki parametrit, muuttujat ym. tulee määritellä erikseen. Nämä tiedot syötetään listoina tai taulukkoina. Itse mallit on kuvattu selkeästi ja ytimekkäästi helppolukuisina lauseina.

Ohjelmistosta on vapaasti saatavilla runsaasti materiaalia, jonka avulla GAMSin opiskelu ja käyttö onnistuvat tuloksettaasti [24], [6]. Sovellusesimerkkejä on kerätty kirjastoon, josta niitä voi hakea esimerkiksi tekijän tai aihealueen perusteella. Ohjelmistoon tutustuminen sujuu kätevästi ilmaisversion avulla. Sen käyttöaika ei ole rajoitettu, mutta muuttujien ja rajoitteiden määrä on rajallinen. Kappaleessa 5 esitetyissä mallinnusajoissa käytettiin ohjelmiston ilmaisversiota 23.5.

4.2. Optimointimenetelmät

GAMS/Cplex on ratkaisija, jossa on yhdistetty Cplex-optimoija GAMSin mallinnusympäristöön. Tässä työssä käytetty malli muodostaa sekalukuoptimointitehtävän [23, s. 56], joka yleisesti voi olla hyvin paljon tietokoneen muistia ja laskenta-aikaa tarvitseva. Sekalukuoptimointitehtävässä muodostuu, kun mallin lausekkeissa esiintyy kokonaislukuvektoreita ja jatkuvia reaalityyppisiä sisältäviä

vektoreita ja näiden vakio(vektori)kertoimilla painotettuja summia [19]. Kuten luvussa 5 esitetään, kaikki mallin päätösmuuttujat ovat (diskreettejä) binäärimuuttujia. Rakennetussa GAMS-mallissa myös kohdefunktion arvoa käsitellään (vapaana) muuttujana, jolloin koko tehtävästä muodostuu sekalukuoptimointitehtävä. Mallinnusajoissa käytettyyn ilmaisversioon sisältyy Cplexin versio 12.2 [7], [3].

Cplexin MIP-algoritmi (Mixed Integer Programming, sekalukuoptimointitehtävä) käyttää branch-and-bound hakua yhdessä monipuolisten algoritmiominaisuuksien kanssa. Tällaisia ominaisuuksia ovat esimerkiksi cuts and heuristics [7]. Branch-and-bound hakua on selvitetty lähteessä [23, s. 651–680]. Hakualgoritmia ei käyttäjän tarvitse välttämättä tuntea tämän enempää, koska ohjelmistolle riittää, että käyttäjä vain määrittelee Cplexin algoritmiksi MIP-algoritmin. Mikäli suppenemisessa tai tarkkuudessa tulee ongelmia, on Cplexin MIP-optimoinnin ongelmien vähentämiseen ohjeita erillisellä sivustolla [4].

4.3. Ohjelmiston mallille antamat mahdollisuudet ja rajoitukset

GAMS tarjoaa liitännän syöttötietojen antamista ja tulosten esittämistä varten erittäin yleisessä käytössä olevaan Microsoft Excel-ohjelmaan. Sen avulla syöttötietojen antaminen on helppoa sekä selkeää ja itse ohjelmatiedostoon ei tarvitse koskea. Tulokset saadaan Excel-ohjelman avulla helposti havainnoitavaan ja esityskelpoiseen muotoon [8].

Koska lineaarisen optimointimallin ratkaiseminen on helpompaa ja tarkempaa [16, s. 39], on tässä työssä käytetty lineaaristen mallien optimointiin tarkoitettua Cplexin MIP-ratkaisijaa. Cplexistä löytyy kyllä tarvittaessa myös epälineaaristen mallien optimointiin sopivat ratkaisijat, esimerkiksi MINLP (Mixed-Integer Non-Linear Programming). MIP-ratkasija sallii vain lineaariset yhtälöt, joten tavoitefunktioissa ja rajoituksissa tulee kiinnittää huomiota mm. laskentajärjestykseen. Yksityiskohtana voidaan myös mainita, että lineaarista mallia muodostettaessa todettiin, että päätösmuuttuja ei voi olla pyöristysfunktion kohteena.

5. ENSIHOIDON OPTIMOINTIMALLINNUS

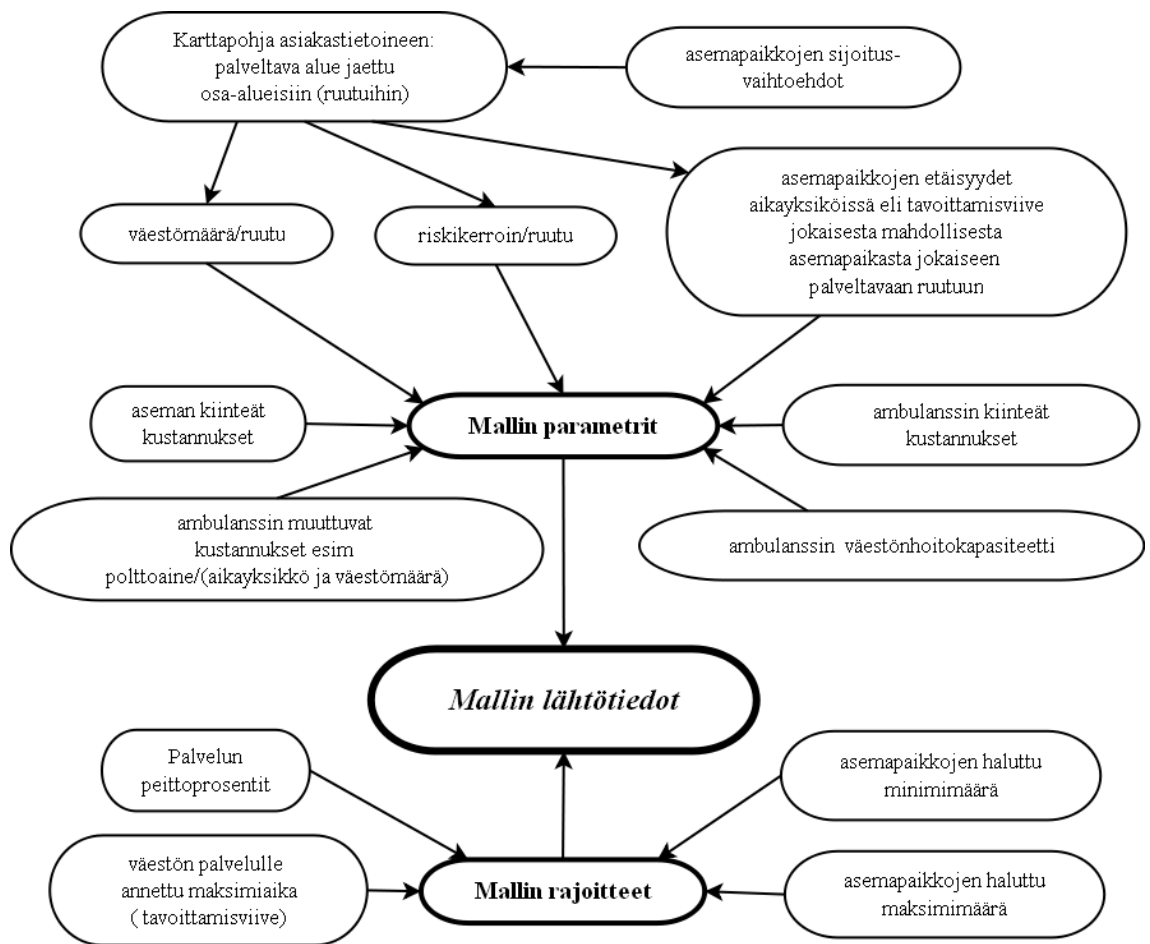
Tässä luvussa esitetään ensihoidon sovelluksen mallinnusta tarkemmin. Ensihoidon keskeiset tavoitteet ovat keskenään ristiriitaisia niin, että pyrittäessä toiminnan kustannusten laskemiseen samalla palvelutaso heikkenee. Toisaalta palvelutasoa parannettaessa kustannukset pyrkivät nousemaan. Palvelutasoon katsotaan tässä kuuluvan aika, jossa asiakas saa palvelun eli ambulanssi (yleisessä tapauksessa ensihoitoyksikkö) saapuu paikalle, sekä palvelun peitto(prosentti) eli niiden asiakkaiden osuus, jotka saavat palvelun tuossa määritellyssä ajassa. Mallinnusongelma voitaisiin hyvin rakentaa näiden kolmen tavoitteen monitavoiteoptimointina, mutta esitetty malli perustuu yhden komponentin – kustannusten – minimointiin, kun palvelun peitto on rajoitteena ja palvelulle asetettu aikaraja (tavoittamisviive) annetaan lähtötietona. Näin monitavoiteoptimoinnin menetelmänä käytetään luvussa 3.2 käsiteltyä rajoiteyhtälömenetelmää.

Palvelupeitto(prosentti) -rajoitteella on tunnettu vaihteluväli 0...100 %:iin. Siis huonoimmillaan kukaan ei saa palvelua ja parhaimmillaan kaikille asukkaille voidaan tarjota palvelu. Palvelupeitto -rajoite saa tässä mallissa diskreetit arvot: 20, 40, 60, 80 ja 100 %. Palvelua tarjoamatonta tilannetta (0 %) ei tutkita. Mallia muokkaamalla optimointirajoitteiden arvoja ja niiden lukumäärää voidaan vapaasti tarvittaessa vaihtaa.

Palvelulta vaadittava aikaraja on valittu lähtötiedoksi käytännön kysymysasettelun takia. Puhutaan esimerkiksi asiakkaiden palveluvaatimuksesta 5, 8 tai 10 minuutin aikarajan puitteissa. Käyttämällä aikarajaa vastaavalla tavalla kuin palvelun peittoa mallissa rajoitteena, jonka mahdollisilla arvoilla kustannukset optimoitaisiin, saataisiin monitavoiteoptimointimalli kaikkien kolmen komponentin yhdenaikaiseksi optimoimiseksi.

5.1. Mallin syöttötiedot ja tulosten esittäminen

Laskentaa varten mallille syötetään lähtötiedot Excel-ohjelman avulla. Tarvittavat lähtötiedot kuvataan oheisessa kaaviossa (Kuva 1).



Kuva 1: Mallin lähtötietojen muodostuminen

Optimoinnin tulokset saadaan samaan Excel – tiedostoon omille sivuilleen laskennan päätyttyä. Tämä mahdollistaa tulosten helpon muokkaamisen haluttuun esitysasun ja mahdollista jatkokäsittelyä varten.

5.2. Ensihoidon malli

Malli on toteutettu kolmella eri tasolla. Täydellisimmällä mallin tasolla (III laskenta) on muodostettu niin, että sen avulla löydetään optimikustannukset halutulla palvelun aikarajalla ja peitto prosentilla [23, s. 594 - 597], [17, s. 169 – 171]. Kustannukset minimoidaan asemakohtaisesti ja lasketaan tarvittava lukumäärällisesti rajattu asemapaikkojen sijoitus (sekä näille tarvittava ambulanssien määrä) halutun palvelupeitto prosenttien saavuttamiseksi. Optimoinnin tuloksena siis saadaan kiinteät

sijoituspaikat määrätyillä tavoitteilla (eli rajoituksilla), joita ovat asemien minimi- ja maksimimäärät sekä palvelupeittoprosentti ja saavutettavuuden aikaraja eli tavoittamisviive. Esimerkkinä optimointitavoitteesta voisi olla kustannusten minimoinnissa tarvittavien asemapaikkojen (ja ambulanssien) määrä ja sijoituspaikat, kun tavoitteena olisi 80 %:n palvelupeitto 5 minuutin saavutettavuudella.

Edellistä tukemaan on toteutettu kaksi pienempää ja suoraviivaisempaa mallin tasoa sen kelpoisuuden (eli validityn [23, s. 11]) lisäämiseksi: minimipeittomalli (I laskenta) ja maksimipeittomalli (II laskenta). Minimipeittomallilla [23, s. 566–570], [17, s. 158–159] saadaan tarvittavien ambulanssiasemien minimimäärä 100 %:n palvelupeiton saavuttamiseksi. Maksimipeittomallilla [23, s. 570 - 571], [17, s. 159 - 160] selviää mihin asemat tulee sijoittaa, jotta asemien sallitulla maksimimäärällä saadaan suurin mahdollinen palvelupeittoprosentti.

5.3. Indeksointi

Indeksit yksilöivät tilanteen, paikan, vaihtoehdon tms. tietyytyyppisten ominaisuuksien joukosta. Näitä indeksejä ovat

a eli "asemat" (mahdollinen asemapaikka kokonaislukuna 1, 2, 3, ...),

kl eli "kustannusten laatu" (yksilöi kustannuksen esimerkiksi kiinteäksi kustannukseksi, $kl = \{\text{kiinteat, muuttuvat, ambulanssi}\}$),

p eli "karttaruutujen painoarvo" (jokaiselle ruudulle matriisissa määritelty yksilöllinen painoarvo, $p = \{\text{vaestomaara, riskikerroin}\}$),

po eli "prosentti_osuus_pisteet" (laskennassa käytettävän palvelupeittoprosentin valinta, $po = \{po20, po40, po60, po80, po100\}$),

pro eli "prosenttiapuluvut" (laskennassa käytettävät palvelupeiton prosenttiluvut, $pro = \{\text{prosentti, prosentti2}\}$, Prosentti2 ei ole nyt käytössä),

r eli "karttaruutujen rivit" (karttapohja on jaettu ruutumatriisiksi, jonka rivin *r* määrittää, $r = \{r1, r2, r3, \dots\}$),

s eli "karttaruutujen sarakkeet" (karttapohja on jaettu ruutumatriisiksi, jonka sarakkeen *s* määrittää, $s = \{s1, s2, s3, \dots\}$),

5.4. Parametrit

Parametrit ovat yleensä tekijöitä, joiden arvot annetaan mallille tiedoksi eikä niiden arvoon optimoinnin kuluessa puututa. Tässä mallissa parametrien arvot syötetään Excel-tiedoston avulla. Mallissa on myös apuparametreja, joiden arvoihin tallennetaan ohjelman vaiheellisessa juoksussa tarvittavia välituloksia. Ne luetellaan omassa osuudessaan luvun lopussa. Parametreja ovat

aamax eli ”tavoitteena olevien ambulanssiasemien maksimimäärä”,

aamin eli ”tavoitteena olevien ambulanssiasemien minimimäärä”,

ak eli ”yhden ambulanssin hoitokapasiteetti” (luku kuvaa väestöpohjan suuruutta, jonka yksi ambulanssi voi hoitaa),

Etaisyys(r, s, a) eli ”aseman (a) ja ruudun (r,s) etäisyys aikayksiköissä” (asema sijaitsee pienimmän arvon omaavassa ruudussa: esimerkiksi malliajossa, kun $Etaisyys(r, s, a) = 1$).

Ku(a,kl) eli ”kiinteät tai muuttuvat kustannukset” (asemaa kohti sekä ambulanssin kiinteät (auto + henkilöstöpalkat ym.) ja muuttuvat kustannukset (polttoaine, keli jne.) etäisyyden (eli matka-ajan) suhteen),

PalveluAikaRaja eli ”tavoiteltava palvelu aikaraja” (tavoittamisviive),

Pros(po,pro) eli ”prosenttiosuus” (kullakin laskentakierroksella tavoiteltava palvelupeittoprosentti),

RuudunPaino(r,s,p) eli ”ruudun paino väestömäärän ja riskikertoimen suhteen”.

Ruudun riskikerroin toimii ko. ruudun painoa nostavana tekijänä. Kyseisen ruudun väestömäärä kerrotaan sen ruudun riskikertoimella. Saatua lukua kutsutaan Painokertoimeksi (katso seuraavassa apuparametrit). Näin painotetaan eri ruutuja eriarvoisiksi toisiinsa nähden tarvittavia ambulanssimääriä ja asemalla sijoitettavien ambulanssien muuttuvia kustannuksia laskettaessa.

Apuparametreja lasketaan mallin laskennan välituloksien siirtämiseen vaiheesta toiseen. Näitä ovat

asemiaI(a) eli ”asemien määrä I tasolla”,

asemiakust eli ”kustannuslaskennassa (III tasolla) oletettu asemien määrä”,

i(r,s) eli ”asemaehdokkaiden määrä, jotka voivat palvella kutakin ruutua”,

ii(r,s) eli ”käyttöön otettavien asemien määrä, jotka palvelevat kutakin ruutua”,

j(r,s) eli ”ruudut, joita ei voida palvella laskettavalla asemamäärällä ja palvelupeittoprosentilla”.

jj(po,r,s) eli ”ruudut, joita ei voida palvella laskettavalla asemamäärällä jo alun perin (, kun otetaan aseman ja ruudun välinen etäisyys huomioon”.

AmbulanssienMaara(a) eli ”asemakohtainen ambulanssien määrä”,

AmbulanssienMaaraII(a) eli ”asemakohtainen ambulanssien määrä II tasolla”,

AmbulanssitMinimissa(po,a) eli ”tarvittavat ambulanssit asemilla minimissä (kustannusoptimissa) tietyllä palvelupeittoprosentilla”,

AsemaKustannusMinimi(po,a) eli ”asemakohtainen kustannus minimissä (kustannusoptimissa) tietyllä palvelupeittoprosentilla”,

AsematMinimissa(po,a) eli ”tarvittavat asemat minimissä (kustannusoptimissa) tietyllä palvelupeittoprosentilla”,

KokonaisKustannus eli ”ratkaisun kokonaiskustannus”,

KokonaisKustannusII eli ”kokonaiskustannus II tasolla”,

Kustannus(a) eli ”asemakohtainen kustannus”

KustannusII(a) eli (asemakohtainen kustannus II tasolla”,

MinimiKustannus(po) eli ”kustannukset yhteensä minimissä (kustannusoptimissa) tietyllä palvelupeittoprosentilla”,

Painokerroin(r,s) eli ”ruudun (r,s) painokerroin” (saadaan kertomalla ruudun (r,s) vaestomaara ja riskikerroin keskenään),

Palvelee(a,r,s) eli ”ruudut (r,s), joita asema a pystyy palvelemaan”,

PalveleeEKA(a,r,s) eli ”apuparametri tulostukseen ja välivaiheiden

seurantaan”,
PalveleeTOKA(a,r,s) eli ”apuparametri tulostukseen ja välivaiheiden seurantaan”,
PalveleeKust(a,r,s) eli ”III tasolla eli kustannuslaskentavaiheessa ruudut (r,s) , joita asema a palvelee” (voi sisältää päällekkäistä palvelua),
PalveleeKustPO(a,r,s) eli ” III tasolla kustannuslaskentavaiheessa ruudut (r,s) , joita asema a palvelee yksin” (päällekkäisesti palvelut ruudut jaettu asemien kesken ja palvelaan vaan vaaditun peittoprosentin verran),
PalveleeYksin(a,r,s) eli ”ruudut (r,s) , joita asema a palvelee yksin” (palvelut ruudut jaettu asemien kesken),
PalveltavatRuudutMinimissa(po,a,r,s) eli ”palvelua saavat ruudut minimissä (kustannusoptimissa) tietyllä palvelupeittoprosentilla”,
PalvelupeittoII eli ”palvelupeittoprosentti II tasolla (maksimipeittoprosentti)”,
Prosentti eli ”laskennassa kullakin hetkellä käytettävä palveluprosentti”,
ProsenttiOsuus eli ”palvelupeittoprosentti” (kullakin hetkellä laskennassa käytössä oleva palvelupeiton osuus prosentteina),
ProsenttiOsuusMinimissa(po) eli ”palvelupeittoprosentti minimissä (kustannusoptimissa)”,
RuudutIlmanPalveluaMinimissa(po,r,s) eli ”ruudut, jotka jäävät ilman palvelua tietyllä palvelupeittoprosentilla lasketussa minimissä (kustannusoptimissa)”.

Ambulanssiasemat voivat olla tavallisia ambulansseja tai muita ensihoitojärjestelmän kulkuvälineitä varten. Asemien ja ambulanssien kustannukset – kiinteät ja muuttuvat – ovat asemakohtaisia, jolloin voidaan lisätä esimerkiksi asema, jossa on helikoptereita (lääkärihelikopterien toimipaikka). Tällöin ambulanssikustannukset (nyt helikopterikustannukset) ovat tällä asemalla normaaleja sairausautoja korkeammat. Myös muuttuvat eli polttoaine, huolto ym. kulut määritellään asemakohtaisesti. Yhden ambulanssin tai helikopterin hoitokapasiteetti on oletettu yhtä suureksi.

5.5. Päätösmuuttujat

Päätösmuuttujien arvoja mallissa muutetaan tavoitteiden saavuttamiseksi rajoitteiden määrittelemissä rajoissa. Päätösmuuttujia ovat

$x(a)$ eli ”asema a käytössä” (binäärinen muuttuja; asema käytössä, kun arvo =1, muuten 0),

$y(r,s)$ eli ”ruudut (r,s) joissa ei palvelua” (binäärinen muuttuja II tasolla ja III tason 1. vaiheessa; arvo 1, jos asema ei käytössä, muuten 0),

$z(r,s)$ eli ”ruudut (r,s) , joista voidaan vähentää palvelua III tason 2. vaiheessa” (binäärinen muuttuja III tason 2. vaiheessa; arvo 1, jos asema ei käytössä, muuten 0).

Kaikki ruudut, joissa ei ole palvelua, ovat päätösmuuttuja $z(r,s)$ ja apuparametri $j(r,s)$ yhdessä.

5.6. Malliyhtälöt: Kohdefunktiot ja rajoitteet

Kohdefunktiota minimoidaan (tai maksimoidaan) päätösmuuttujien arvoja varioiden. Päätösmuuttujien optimiarvoilla ratkaisu minimoi (tai maksimoi) kohdefunktion kuitenkin niin, että rajoite-ehdot täyttyvät.

5.6.1 Tason I malliyhtälöt: kohdefunktiot ja rajoitteet

Minimipeittomallissa lasketaan asemien minimimäärä kaikkien ruutujen kattamiseksi täydellisesti. Näin saadaan tarvittava asemien määrä ja niiden sijoituspaikat.

Minimipeittomallin eli I tason kohdefunktio on *palvelukohdefunktio* eli tarvittavien asemapaikkojen yhteismäärä. Tämä tason I malli ei ota huomioon ruutujen (r,s) painoarvoja tai muita niiden ominaisuuksia. *Palvelukohdefunktio* on

$$asemia = \sum_a x(a),$$

missä *asemia* on palvelukohdefunktion arvo (ambulanssiasemien määrä).

Minimipeittomallin eli I tason rajoite muodostuu vaatimuksesta, että ainakin yksi asema a palvelee jokaista ruutua (r,s) . Rajoite *palvelu* eli ruutua (r,s) palvelemaan kykenevät asemat a on

$$\sum_a \text{Palvelee}(a, r, s)x(a) \geq 1.$$

5.6.2 Tason II malliyhtälöt: kohdefunktiot ja rajoitteet

Maksimipeittoprosenttimallilla ratkaistaan ensin asemapaikat annetulla asemapaikkojen maksimirajoitteella. Tämän jälkeen jaetaan ruudut kustannusten minimoimiseksi niin, että vain yksi asema palvelee kutakin ruutua. Päällekkäisyys poistetaan käyttäen ehtona ruudun ja aseman välisen etäisyyden aiheuttamia kustannuksia. Valitaan asema, joka on lyhimmän kustannuspainotetun etäisyyden päässä ko. päällekkäisen palvelun ruudusta. Mikäli painotetut etäisyydet ovat samat, asemalistassa edellä oleva valitaan.

Tulos tallennetaan parametriin $\text{PalveleeYksin}(a,r,s)$. Käyttöön otettaville asemapaikoille lasketaan tarvittavat ambulanssien määrät. Kun lasketaan asemakohtaiset kustannukset yhteen, saadaan kokonaiskustannus, joka on samalla minimikustannus 100 %:n palvelupeatolle.

Maksimipeittoprosenttimallin eli II tason kohdefunktio saadaan laskemalla kaikkien palveltavien asukkaiden suhde kaikkien asukkaiden määrään. Tämä saadaan kun lasketaan palvelemattomien ruutujen $y(r,s)$ asukkaiden painotetun lukumäärän suhde kaikkien asukkaiden painotettuun lukumäärään, tämä vähennetään yhdestä ja muutetaan edelleen sadalla kertomalla prosenteiksi. Näin II tason *palvelupeittokohdefunktio* eli palvelun peiton arvo (0...100 %) on

$$pp = 100 \left(1 - \frac{\sum_{r,s} \text{Painokerroin}(r,s)y(r,s)}{\sum_{r,s} \text{Painokerroin}(r,s)} \right),$$

missä pp on *palvelupeittokohdefunktion* arvo (palvelupeittoprosentti).

Maksimipeittoprosenttimallin eli II tason rajoitteita ovat *palvelupeitto* ja *ambulanssiasemienmaara*. Rajoite *palvelupeitto* muodostuu vaatimuksesta, että kaikkien ruutujen (r,s) on joko oltava ainakin jonkun aseman palvelema tai ruutu (r,s) on merkittävä palvelemattomaksi $y(r,s)=1$. Rajoite *palvelupeitto* on

$$\sum_a \text{Palvelee}(a,r,s) x(a) + y(r,s) \geq 1.$$

Rajoite *ambulanssiasemienmaara* rajoittaa ambulanssiasemien a määrän parametrin $aamax$ ilmoittamaan maksimimäärään. Rajoite *ambulanssiasemienmaara* on

$$\sum_a x(a) \leq aamax.$$

5.6.3 Tason III malliyhtälöt: kohdefunktiot ja rajoitteet

Kustannusten minimointi suoritetaan kahdessa vaiheessa, jotka esitellään yksityiskohtaisemmin seuraavissa luvuissa. Tähän alkuun on koostettu optimoinnin kahden vaiheen eteneminen pohjustukseksi.

Ensimmäisessä vaiheessa optimoidaan minimikustannuksiin verrannollinen painotettu kustannusfunktio kullakin luvallisella asemamäärällä. Kustannusfunktiota painotetaan kertoimella, joka on käänteisluku aseman palvelemien ruutujen painokertoimien summan (+1) ja kaikkien ruutujen painokertoimien summan suhteesta. Kerroin kuvaa aseman sijainnin hyvyttä: mitä suurempaa osaa koko palvelualueen asukkaista voidaan kyseiseltä asemalta palvella, sitä pienempi kerroin on. Mitä pienempi kerroin on, sitä kannattavampaa on valita kyseinen asema käyttöön. Aseman palveleminen ruutujen painokertoimiin on lisätty 1 yksinkertaisesti nolalla jaon välttämiseksi.

Ratkaisua haettaessa otetaan huomioon palvelupeittovaatimus rajoitteena. Lisäksi rajoitteena olevan asemien määrän tulee olla vähintään annettu minimimäärä ja enintään maksimimäärä. Näin saadaan ratkaistua asemapaikat ja ilman palvelua jäävät ruudut. Tässä vaiheessa voi jäädä päällekkäistä palvelua ruutuihin eli useampi asema palvelee yhtä ja samaa ruutua.

Seuraavaksi ensimmäinen vaihe viimeistellään poistamalla päällekkäisyys. Poistamisen ehtona on ruudun ja aseman välisen etäisyyden aiheuttamat kustannukset. Valitaan asema, joka on lyhimmän kustannuspainotetun etäisyyden päässä ko. päällekkäisen palvelun ruudusta. Mikäli painotetut etäisyydet ovat samat, asemalistassa edellä oleva valitaan.

Toisessa vaiheessa optimoidaan (minimoidaan) kustannuksia edelleen ottamalla huomioon palvelupeittovaatimus asemakohtaisesti. Siis ei palvelua enempää kuin vaaditaan palvelupeittoprosentin puitteissa. Näin saadaan optimiratkaisu asemien määrälle ja sijoituspaikoille ja talletetaan se parametriin $PalveleeKustPO(a,r,s)$. Edelleen lasketaan tarvittava ambulanssien määrä kullekin asemapaikalle.

Kun nyt tunnetaan optimiratkaisu tietyllä asemamäärällä ja palvelupeittoprosentilla, on enää haettava näistä ratkaisuista minimikustannuksen tuottavat ratkaisut kullakin palvelupeittoprosentilla. Tämä tapahtuu vertaamalla kullakin palvelupeittoprosentilla saatujen ratkaisujen kustannuksia ja valitsemalla näistä ratkaisuista se, jolla on pienin kokonaiskustannus. Näin saadaan ratkaisuparit, joissa kutakin palvelupeittoprosenttia vastaavat sen pienimmät mahdolliset kokonaiskustannukset.

5.6.3.1 Tason III ensimmäinen vaihe/kierros: kohdefunktiot ja rajoitteet

Kustannusoptimoinnin ensimmäisessä vaiheessa asemien a aiheuttama kokonaiskustannus on kohdefunktio $asemien_kokonaiskustannus$:

$$\begin{aligned}
 & KoKust \\
 &= \sum_a \left\{ x(a) \frac{\sum_{r,s} Painokerroin(r,s)}{\sum_{r,s} (Palvelee(a,r,s)Painokerroin(r,s) + 1)} [Ku(a,' kiinteat')] \right. \\
 &+ \sum_{r,s} Ku(a,' muuttuvat') Palvelee(a,r,s) Etaisyys(r,s,a) Painokerroin(r,s) \\
 &+ \sum_{r,s} Ku(a,' ambulanssi') \\
 &\left. * Round \left(0.4999 + \frac{Painokerroin(r,s) Palvelee(a,r,s)}{ak} \right) \right\}.
 \end{aligned}$$

KoKust on kustannuskohdefunktion arvo eli painotettu kokonaiskustannuksiin verrannollinen arvo. Kustannusfunktiossa lasketaan yhteen jokaisen käyttöön otettavan aseman kiinteät, kustannukset, kaikki muuttuvat kustannukset ja ambulanssien kiinteät kustannukset. Kiinteitä kustannuksia laskettaessa tiettyä asemaa painotetaan kertoimella, joka on verrannollinen aseman keskeisestä sijainnista riippuvaan kilpailukykyyn. Kiinteitä kustannuksia painottava kerroin on siis

$$\frac{\sum_{r,s} \text{Painokerroin}(r,s)}{\sum_{r,s} (\text{Palvelee}(a,r,s) \text{Painokerroin}(r,s) + 1)}$$

joka on käänteisluku aseman palvelemien ruutujen painokertoimien summan (+1) ja kaikkien ruutujen painokertoimien summan suhteesta.

Painokertoimessa esiintyvän lisätyn ykkösen (+1) tulkitaan tarkoittavan oman ruudun osuutta. Samalla se estää nolllalla jaon. Kaavassa esiintyvä pyöristys tarvitaan, koska pienikin ambulanssikapasiteetin tarve vaatii kokonaisen ambulanssin. Siis ambulanssitarve pyöristetään ylöspäin kokonaislukuun.

Kustannusoptimoinnin ensimmäisessä vaiheessa rajoitteina ovat *ambulanssiasemia*, *palvelupeittovaatimus* ja *palvelupeitto*. Rajoite *ambulanssiasemia* rajoittaa käyttöön otettavien asemien määrän parametrin *asemiakust* ilmoittamaan maksimiarvoon. Kustannuslaskennan rajoite *ambulanssiasemia* on

$$\sum_a x(a) = \text{asemiakust}.$$

Rajoite *palvelupeittovaatimus* asettaa minimivaatimuksen palvelun peitolle, joka lasketaan kuten II tasolla arvo *pp*:lle. Kustannusoptimoinnin palvelupeiton prosenttiosuusvaatimus on *palvelupeittovaatimus*:

$$\text{ProsenttiOsuus} \leq 100 \left(1 - \frac{\sum_{r,s} \text{Painokerroin}(r,s) y(r,s)}{\sum_{r,s} \text{Painokerroin}(r,s)} \right).$$

Rajoite *palvelupeitto* asettaa myös vastaavan vaatimuksen kuin tasolla II. Vaatimus on, että ainakin yhden aseman a on kyettävä palvelemaan jokaista ruutua (r,s) tai se on merkittävä ruuduksi ilman palvelua $y(r,s)=1$. Rajoite *palvelupeitto* on

$$\sum_a \text{Palvelee}(a, r, s)x(a) + y(r, s) \geq 1.$$

5.6.3.2 Tason III toinen vaihe/kierros: kohdefunktiot ja rajoitteet

Kustannusoptimoinnin toisessa vaiheessa minimoidaan jäljelle jääneiden asemien a aiheuttamat kustannukset. Kustannusten kohdefunktio on *asemakohtainen_kustannus_optimointi*:

$$\begin{aligned} KoKustPO = & \sum_a x.l(a)\{Ku(a, \text{kiinteät}') \\ & + \sum_{r,s} [Ku(a, \text{muuttuvat}') (1 - z(r, s)) \\ & * \text{PalveleeKustPO}(a, r, s) \text{Etaysyys}(r, s, a) \text{Painokerroin}(r, s)] \\ & + \sum_{r,s} [Ku(a, \text{ambulanssi}') \\ & * \left(\frac{\text{Painokerroin}(r, s) (1 - z(r, s)) \text{PalveleeKustPO}(a, r, s)}{ak} \right)]\}. \end{aligned}$$

KoKustPO on palvelupeittoprosenttioptimoidun kustannuskohdefunktion arvo eli painotettu kokonaiskustannuksiin verrannollinen arvo. Toisessa vaiheessa lasketaan kustannukset yhteen kuten ensimmäisessä vaiheessa. Kiinteissä kustannuksissa otetaan laskennassa huomioon vain ensimmäisessä vaiheessa todetut käyttöön otettavat asemat eli kertoimena on $x(a)$:n sijasta $x.l(a)$. Termissä $x.l(a)$ kirjain l määrittelee, että muuttujaa ei enää optimoida, vaan käyttöön otetaan jo aiemmassa optimoinnissa – tässä ensimmäisessä vaiheessa – muuttujalle $x(a)$ saadut arvot. Kiinteitä kustannuksia ei enää tarvitse painottaa, koska asemapaikat on valittu ensimmäisen vaiheen tuloksena. Muuttuvissa kustannuksissa $(1 - z(r,s))$ on 1, kun kyseinen ruutu valitaan palveltavaksi (eli $z(r,s)=0$). Tässä ei voida aiemman tapaa pyöristää viimeisen summatermin viimeistä

sulkulauseketta eli ambulanssien lukumäärää kokonaisluvuksi, sillä MIP-ratkaisija ei salli päätösmuuttujan jäämistä pyöristysfunktion sisälle.

Kustannusoptimoinnin toisessa vaiheessa rajoitteena on *palvelupeittovaatimus_optimointi*. Rajoiteyhtälö *palvelupeittovaatimus_optimointi* lasketaan vastaavasti kuin ensimmäisessä vaiheessa laskettiin rajoiteyhtälö *palvelupeittovaatimus*. Kustannusoptimoinnissa juuri vaadittavalla palvelupeiton prosenttiosuudella rajoite on *palvelupeittovaatimus_optimointi*:

$$ProsenttiOsuus \leq 100 \left(1 - \frac{\sum_{r,s} Painokerroin(r,s)(z(r,s) + j(r,s))}{\sum_{r,s} Painokerroin(r,s)} \right).$$

5.6.3.3 Kustannuslaskennasta

Kustannuslaskennassa lasketaan asemien ja ambulanssien kiinteiden ja muuttuvien kustannusten summa eli kokonaiskustannus jokaisella palvelupeittoprosenttivaihtoehdolla. Lopullinen ambulanssien määrä tarvitaan kustannuslaskennassa ja se lasketaan käyttäen III tason mallin molempien vaiheiden optimoinnin tuloksia. *PalveleeKustPO(a,r,s)* on taulukkomuodossa jokaisen aseman *a* palvelemat ruudut (r,s) . Esimerkiksi, jos asema 1 palvelee ruutua $(4,5)$, on *PalveleeKustPO(1,4,5)=1*. Ambulanssien määrä lasketaan vain käyttöön otettaville asemille, joille $x.l(a)=1$. Kun jokaisen asemakohtaisesti palveltavan ruudun *Painokerroin(r,s)* (= väestömäärä · riskikerroin) lasketaan yhteen ja jaetaan ambulanssikapasiteetilla *ak*, saadaan kullakin käyttöön otettavalla asemalla tarvittava ambulanssien määrä. Ambulanssien määrä pyöristetään vielä ylöspäin kokonaislukuun.

$$\begin{aligned} &AmbulanssienMaara(a) \\ &= Round \left(0.4999 \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sum_{r,s} Painokerroin(r,s) PalveleeKustPO(a,r,s) x.l(a)}{ak} \right). \end{aligned}$$

Asemakohtainen kustannus saadaan laskemalla kunkin aseman a kiinteät kustannukset, kyseisen aseman palvelemien ruutujen aiheuttamat muuttuvat kustannukset ja ambulanssien aiheuttamat kiinteät kustannukset yhteen. Siis asemakohtaiset muuttuvat kustannukset tietyllä palvelupeittoprosentilla ovat

$$\begin{aligned}
 Kustannus(a) &= Ku(a, 'kiinteät') \\
 &+ \sum_{r,s} [Ku(a, 'muuttuvat') PalveleeKustPO(a,r,s) \\
 &* Etaisyys(r,s,a) * Painokerroin(r,s)] \\
 &+ Ku(a, 'ambulanssi') AmbulanssienMaara(a).
 \end{aligned}$$

Kustannus lasketaan edellä esitetyllä tavalla, mikäli aiemmassa laskennassa on saatu ambulanssien määrälle nolasta poikkeava arvo ja lisäksi asema, jolle kustannuksia lasketaan, on tullut valituksi käyttöön. Ehto asemakohtaiseen kustannuslaskentaan on siis

$$(AmbulanssiMaara \neq 0) \wedge (x.l(a) = 1).$$

Kokonaiskustannus on kaikkien valittujen asemien asemakohtaisesti laskettujen kiinteiden ja muuttuvien kustannusten summa kullakin rajoitteena olleella palvelupeittoprosentilla

$$KokonaisKustannus = \sum_a x.l(a)Kustannus(a).$$

5.7. Mallin antamat tulokset

Tulokset saadaan samaan Excel-tiedostoon, johon syöttötietojen arvot määriteltiin. Malli laskee minimipeittomallin ja maksimipeittoprosenttimallin antamien tulosten

lisäksi oleellisimpana pidettävän tuloksen eli Pareto-tehokkaan kustannuksien ja palvelupeittoprosentin suhteen optimoidun ratkaisun. Näissä optimipisteissä saadaan tuloksena arvot *MinimiKustannus*, *ProsenttiOsuusMinimissa*, *AmbulanssitMinimissa*, *AsemakustannusMinimi*, *RuudutIlmanPalveluaMinimissa*, ja *PalveltavatRuudutMinimissa*. Myöhemmin luvussa 6 havainnollistetaan osaa tuloksista esimerkin avulla.

5.8. Mallin tarkka kuvaus

Mallin tarkka kuvaus on liitteessä (Liite 1) GAMS-ohjelman muodossa. Ajamalla kyseinen mallinnusesimerkki on mahdollista seurata *.lst tulostusikkunassa mallin optimoinnin vaiheittaista etenemistä. Ohjelman toiminnan seuraamisen helpottamiseksi on mahdollista ottaa käyttöön runsas määrä "Display"-komentoja.

6. MALLINNUSAJOT

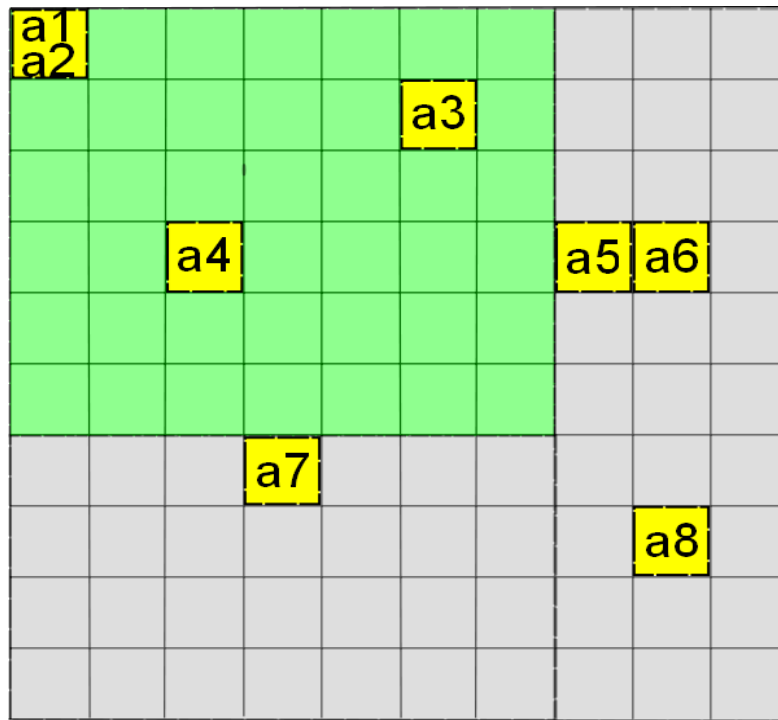
6.1. Taustaa mallinnusajoille

Mallinnusajot antavat kuvan mallin toiminnasta pienillä, helposti hahmotettavilla esimerkeillä. Esimerkeissä on tietty alue, jonka tietylle väestönosalle voidaan tarjota apua tietyn aikarajan ja tiettyjen kustannusten puitteissa. Mallin avulla määritetään asemapaikat ja niille sijoitettavat ambulanssit (tai esimerkiksi helikopterit) ja kokonaiskustannukset.

Mallinnusajoissa on käytetty keksittyjä - ei todellisia - lähtötietoja, jotka on syötetty nimetyillä Excel-tiedostoilla mallille. Tarkemmat kuvaukset on esitetty alemmissa kappaleissa ja tarkemmin nähtävissä vastaavissa Excel-tiedostoissa. Molemmat mallinnusajot on ajettu mallin versiolla 24. Liitteessä 1 on listattuna ohjelma ensihoito24.gms. Toisessa mallinnusajossa on ohjelmassa vaihdettu käsiteltävän Excel-tiedoston nimi ja tämä malli on ensihoito24_heli.gms.

6.2. Mallinnusajo 1

Ensimmäisessä ensihoitoesimerkissä (kuva 2) tutkittava karttapohja on jaettu 10 x 10 ruudukkoon (vihreä ja harmaa alue yhdessä). Tässä matka-aika eli etäisyys asemapaikasta jokaiseen ruutuun on laskettu niin, että ruudusta toiseen matka-aika on 1 aikayksikköä ja vinosti ei voida liikkua syöttötietojen laskennan yksinkertaisuuden takia. Jokainen ruutu kuvaa siis myös matka-aikaa eli etäisyyttä ja yksi ruutu vastaa yhtä (aika)yksikköä. Palveltava väestö (asiakkaat) on vihreällä alueella (vihreät ruudut 6 x 7). Mahdollisia asemapaikkoja on 8 kpl (keltaiset ruudut a1,...,a8).



Kuva 2. Ensimmäisen ensihoitoesimerkin alue ja asemapaikkavaihtoehdot

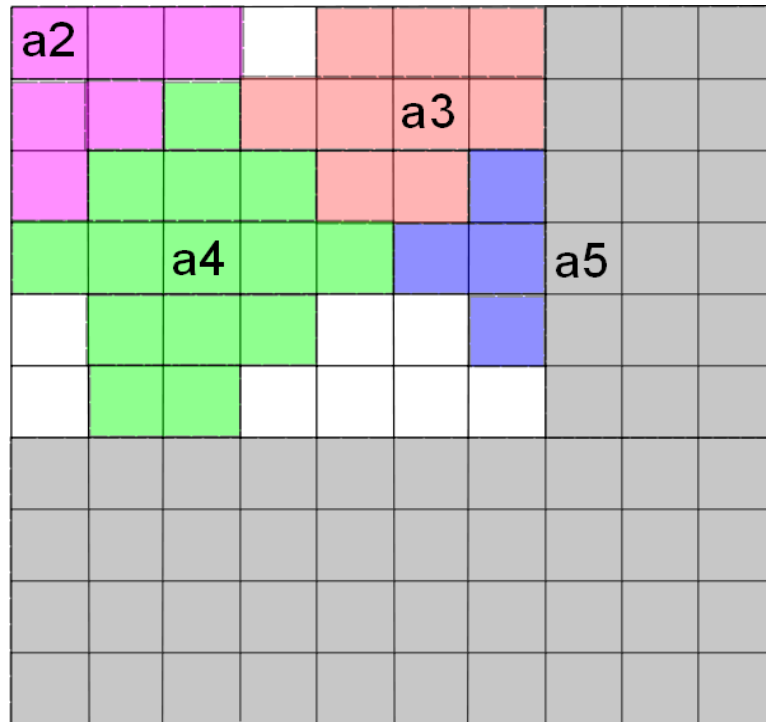
Esimerkissä valitaan enintään viisi (5) asemaa, joilta pystytään saavuttamaan asiakkaat viidessä (5) aikayksikössä. Siis asiakkaan ruudun etäisyys (pysty- tai vaakasuunnassa) on enintään viisi ruutua asemapaikasta. Kaikki nämä lähtötiedot syötetään Excel-tiedostolla ensihoito20.xls (liite2).

Kun GAMS-ohjelma ajetaan, ensin lasketaan 100 %:in peittoon tarvittava asemamäärä. Tuloksena saadaan, että kolme asemaa – asemat 1, 3 ja 7 – riittävät palvelemaan koko alueen. Seuraavaksi lasketaan optimipeitto prosentti määritellyllä maksimiasemamäärällä, joka oli viisi. Edellisen perusteella jo voitiin todeta, että viisi asemaa riittää 100 %:in peittoon.

Edellisten tulosten antaessa suuntaa asemamäärille ja sijoittelulle tason III laskennasta saadaan yksityiskohtaisemmat tulokset kustannukset huomioon ottaen. Kustannusoptimointi tehdään tavoitteena tietty peitto prosentti (20, 40, 60, 80, 100 %) sekä annettu aikaraja(5). Kustannuksia laskettaessa esimerkissä on asemien minimi- ja maksimimäärä annettu eli yhdestä viiteen (1, ..., 5).

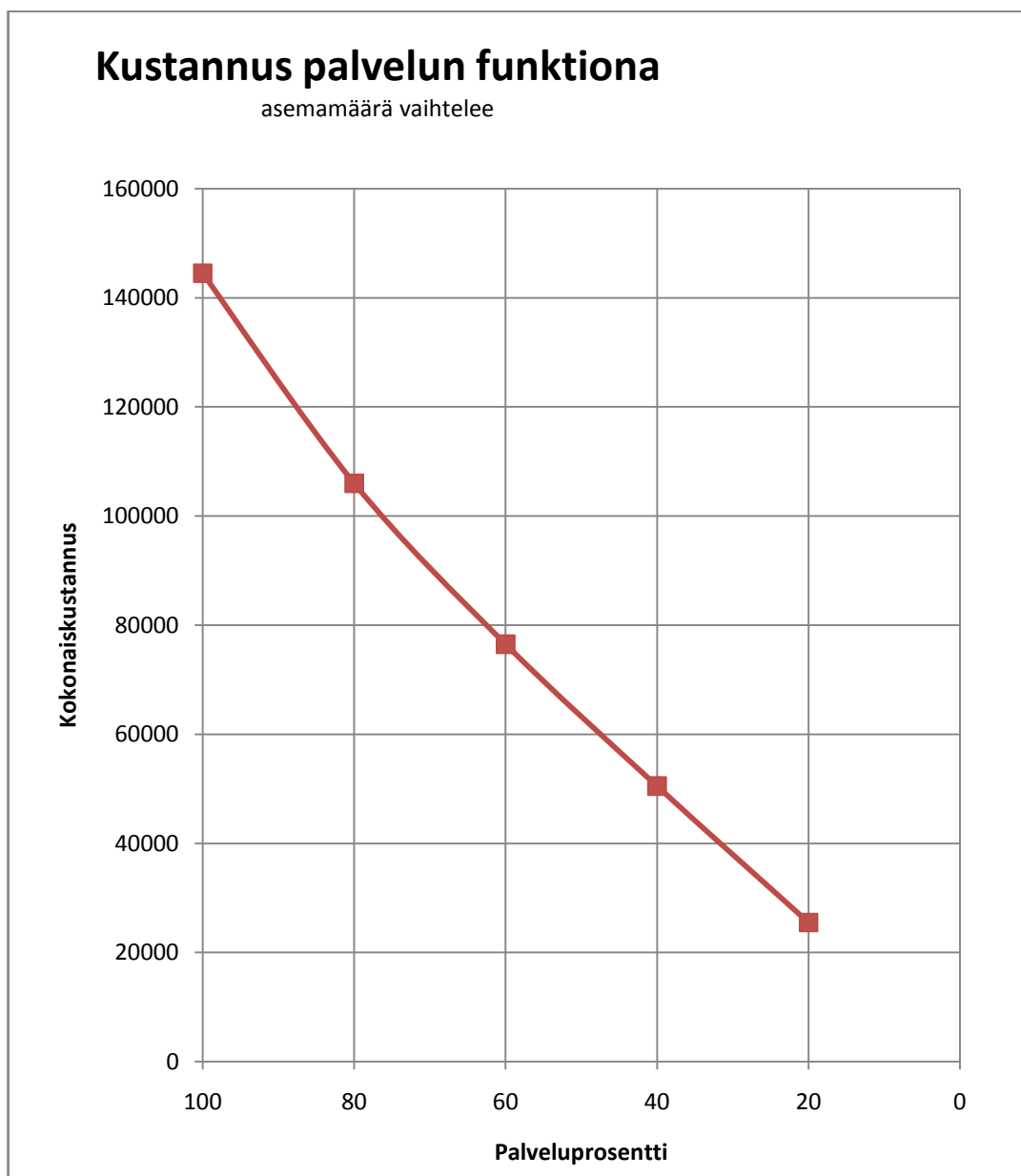
Tulokset saadaan samaan Excel-tiedostoon ensihoito20.xls. Kuvassa 3 on esitetty palvelupeitto prosentilla 80 tulokseksi saadut (valitut) asemapaikat (a2, a3, a4 ja a5). Keskeisellä paikalla olevalle asemalle a4 tulisi sijoittaa kaksi ambulanssia ja muille

asema- paikoille yksi ambulanssi per asema.



Kuva 3. Ensimmäisen esimerkin 80 %:in palvelupeittoprosentilla kustannusoptimoidusti valitut asema- paikat ja niiden palvelemat alueet. Valkoiset ruudut ovat ilman palvelua olevaa aluetta.

Kuvassa 4 näkyy kokonaiskustannus palvelupeittoprosentin funktiona. Kustannukset laskevat, kun yhä pienempää osaa väestöstä palvellaan vaaditussa ajassa. Kustannuksia ei voida kuitenkaan alentaa edelleen käyrän esittämistä arvoista heikentämättä palveluprosenttia. Tuloksena syntynyt käyrä kuvaa *Pareto-optimaalisen* tilanteen eli tilanteen, jossa kumpaakaan komponenteista – kustannusta tai palveluprosenttia - ei voida parantaa huonontamatta toista.

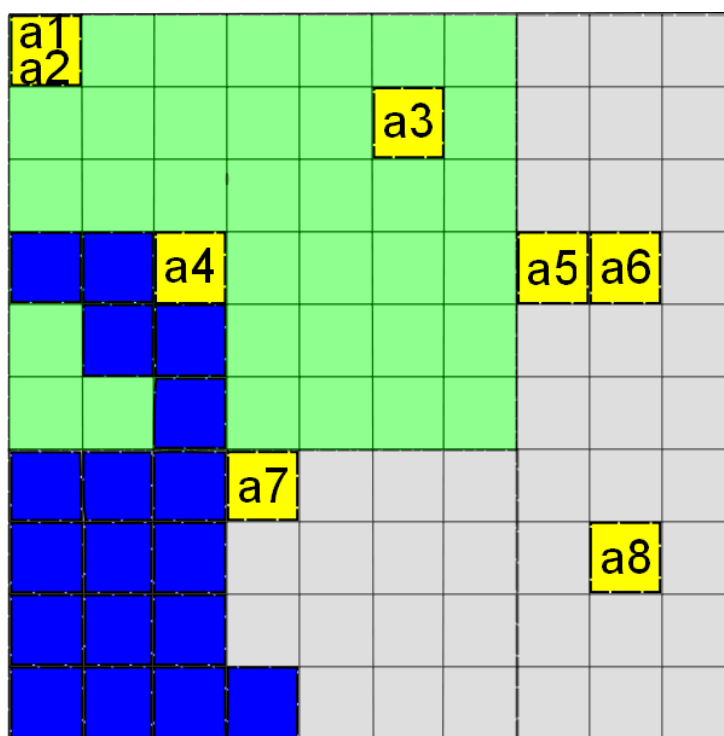


Kuva 4. Pareto-käyrä kustannuksista ja palvelupeittoprosenteista

6.3. Mallinusajo 2 – saaristo ja helikopterit

Toisessa ensihoitoesimerkissä (kuva 5) tutkittava karttapohja on edelleen jaettu 10 x 10 ruudukkoon (vihreä, harmaa ja sininen alue yhdessä). Tässä sininen alue kuvaa merta ja näin vasempaan reunaan jää palvelua tarvitsevaa alue, joka on veden eristämä. Tänne ambulanssilla on todennäköisesti hankala päästä ja ainakin siihen tarvitaan lauttaliikennettä. Saaristoa voidaan kuitenkin palvella esimerkiksi helikoptereiden avulla. Asema a1 on nyt helikopterilla varustettu ensihoidon toimipaikka. Matka-aika

eli etäisyys helikopterilla kuhunkin ruutuun on oletettu olevan viidesosa ambulanssin vastaavaa aikaa pienemmäksi. Meren yli helikopteri etenee kun muuallakin, mutta ambulanssin etenemisajan oletetaan nousevan lauttaliikenteen syystä 10-kertaiseksi eli yksi meriruutu nostaa 10 aikayksikköä lisää ambulanssin matka-aikaa. Toisaalta helikopterin kiinteät ja muuttuvat kustannukset ovat ambulanssiin verrattuna moninkertaiset (oletus 10-kertaiset). Kuten ensimmäisessä esimerkissä palveltava väestö (asiakkaat) on vihreällä alueella (vihreät ruudut 6 x 7). Nyt kuitenkin alueesta jää vähemmän tärkeämmäksi merta kuvaava sininen alue (viisi ruutua entisellä vihreällä alueella), koska meressä ei ole vakinaista väestöä. Merialueelle voidaan kuitenkin kuten muihinkin ruutuihin sijoittaa väestöä niin haluttaessa. Mahdollisia asemapaikkoja on edelleen 8 kpl (keltaiset ruudut a1,...,a8).



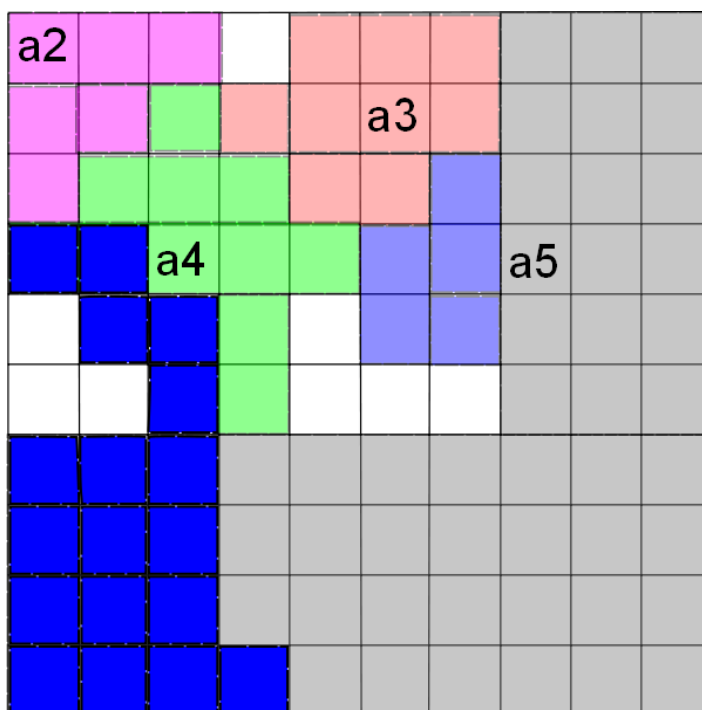
Kuva 5. Toisen ensihoitoesimerkin alue (meri erottaa saariston) ja asemapaikkavaihtoehdot

Kuten edellisessäkin esimerkissä tässä valitaan enintään viisi (5) asemaa, joilta pystytään saavuttamaan asiakkaat viidessä (5) aikayksikössä. Kaikki nämä lähtötiedot syötetään Excel-tiedostolla ensihoito20_heli.xls (liite3).

GAMS-ohjelma ajetaan vastaavasti kuin edellisessä esimerkissä. Tulokset saadaan

Excel-tiedostoon ensihoito20_heli.xls. Huomattavaa on nyt, että tason I laskenta eli minimipeittomalli kertoo yhden aseman eli aseman a1 riittävän palvelemaan koko aluetta. Tämä todella on mahdollista, mutta ei liene kustannuksiltaan kannattavaa. Lisäksi helikoptereita tarvittaisiin merkittävä määrä, jotta kaikki asiakkaat koko alueella saisivat avun. Tason II laskenta antaa tulokseksi, että asemalla a1 tarvittaisiin neljä helikopteria ja kustannukset nousisivat summaan 834 000.

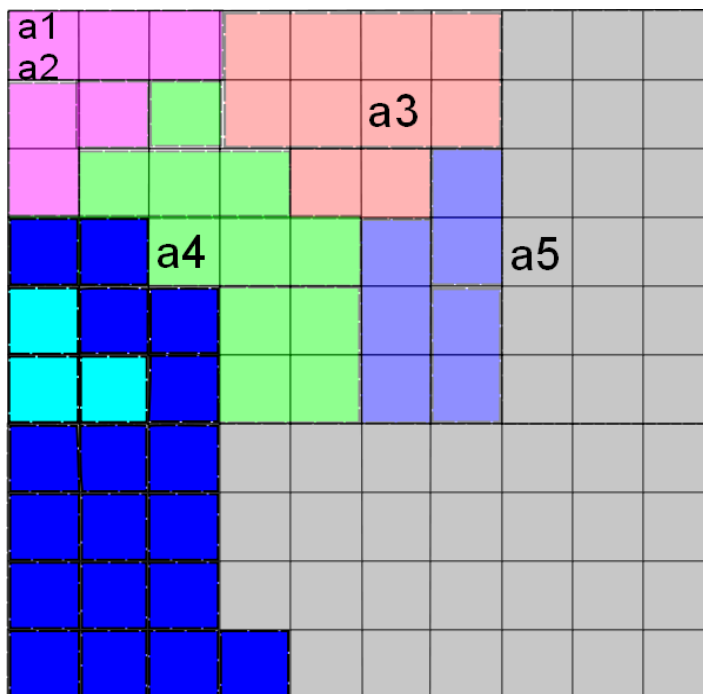
Tason III laskenta järkeistää sijoittelua optimoidessaan kaksivaiheisesti kustannukset. Kuvassa 6 on esimerkkinä esitetty palvelupeittoprosentilla 80 tulokseksi saadut (valitut) asemapaikat (a2, a3, a4 ja a5). Valitut asemat ovat samat kuin edellisessä esimerkissä mutta nyt kustannuksia optimoidessa ilman palvelua jää saaristo. Syynä tähän on saariston korkeat palvelukustannukset käytettäessä helikopteria (asemalta a1). Ambulanssit eivät vaadittavan aikarajan (5 aikayksikköä) sisällä saaristoon pääse.



Kuva 6. Toisen esimerkin 80 %:n palvelupeittoprosentilla kustannusoptimoidusti valitut asemapaikat ja niiden palvelemat alueet. Valkoiset ruudut ovat ilman palvelua olevaa aluetta.

Kun halutaan palvelupeittoprosentiksi 100 %, tarvitaan asema a1 ja helikopteri

käyttöön. Kuvassa 7 näkyy, että myös saaristo (vasen reuna) saa nyt palvelua. Se onnistuu aseman a1 helikoptereiden avulla. Muut ruudut voidaan ja kannattaa hoitaa tavallisten ambulanssien avulla.

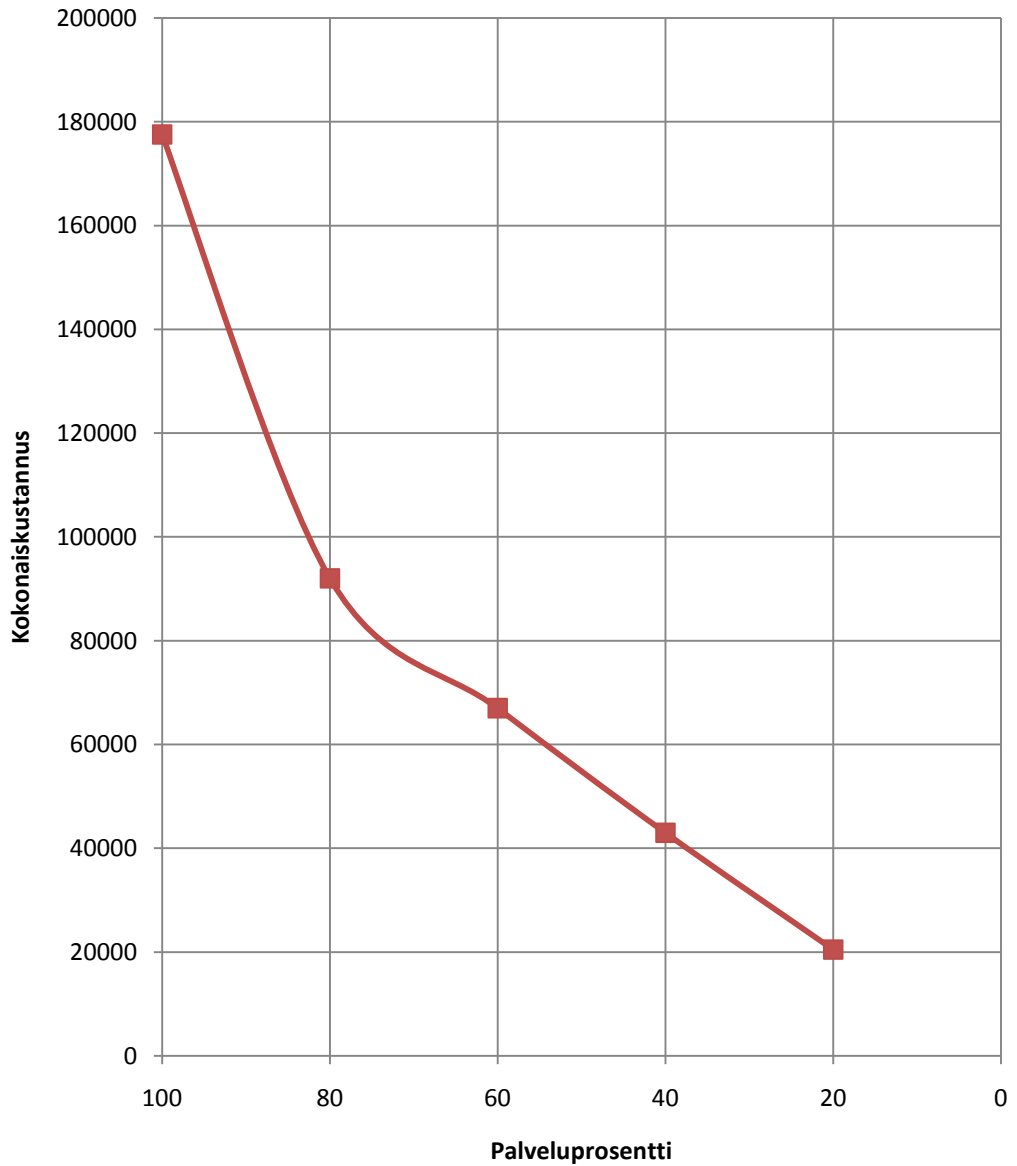


Kuva 7. Toisen esimerkin 100 %:n palvelupeittoprosentilla kustannusoptimoidusti valitut asemapaikat ja niiden palvelemat alueet.

Kuvan 8 käyrä yhdistää kokonaiskustannukset palvelupeittoprosentin funktiona *Pareto-optimaalisissa* tilanteissa. Käyttäytyminen on hyvin samankaltaista kuin edellisessä esimerkissä paitsi 100 %:in peittotilanteessa. Saariston nopea palvelu eli ensihoito helikoptereiden avulla nostaa tällöin kokonaiskustannuksia.

Kustannus palvelun funktiona

asemamäärä vaihtelee



Kuva 8. Pareto-käyrä kustannuksista ja palvelupeittoprosenteista, kun mukana ovat saaristo ja helikopterit

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Avun tarvitsijalle, onnettomuuden uhrille tai sairauskohtauksen saaneelle, on tärkeää avun saannin nopeus. Toisaalta avun tuottamisen kustannuksiin on vain rajallisesti varoja käytettävissä. Valtakunnallisesti ollaan ehdottamassa siirtymistä pienemmistä ensihoidon sopimusalueista pinta-alaltaan ja väestömäärältään laajemman asiakaskannan kattaviin, esimerkiksi sairaanhoitopiirikohtaisiin, palvelualueisiin. Tämä uudistus tarjoaa mahdollisuuden suunnitella ambulanssien määrät ja sijoituspaikat uudelleen, jotta saavutetaan mahdollisimman hyvä tasapaino sekä kustannusten että palvelun peiton osalta. Työssä kehitetty ensihoidon optimointiin käytettävä matemaattinen malli toimii lähtökohtana reaalille optimaalisen kustannusten ja palvelun peiton tuottavalle ambulanssien sijoituspaikkojen ratkaisulle.

Mallin validointi on tehty käyttämällä kahta pientä esimerkkiä ja arvioimalla tuloksia myös graafisesti. Mallia on testattu runsaasti mallin kehityksen aikana ja todettu kustannusminimin löytyneen eri palvelupeittoprosenteilla. Eräänä mielenkiintoisena yksityiskohtana jatkotarkastelussa soisi olevan ensihoitomallin III tason 1. vaiheen optimoinnissa (*KoKust*) käytetty painokerroin ja sen valinnan vaikutukset optimointituloksiin.

Ensihoitomallin parametrien herkkyytarkastelu ja työssä esitettyjä mallinnusajoja laajempien kokonaisuuksien optimointi ovat haasteita mallin mahdollisessa jatkotarkastelussa. Todellisen maailman maantieteellisesti laajat alueet ja suuret tietokannat tuottavat mallille parametrimäärät, jotka kuormittavat laskennassa käytettävää tietokonetta. Isompien tietomäärien käsittelyssä laskenta-aika kasvaa ja olisi mielenkiintoista tutkia reaalisten syöttötietojen määriä, joita tällä mallilla ja nykyaikaisilla tietokoneilla kyettäisiin käsittelemään.

Esitetyn ensihoitomallin validiutta suunnitellaan varmistettavan edelleen erillisen pro gradu -työn puitteissa. Suunnitellussa työssä olisi mahdollista syöttää nyt kehitetylle mallille todellista reaalimaailman tietoa, paikkatietokannat, karttatietokannat, palvelukustannukset jne. Ensihoitomallin antamia tuloksia voitaisiin tällöin verrata toteutettuun nykytilanteeseen ja esimerkiksi muilla keinoilla saatuihin tulevaisuuden suunnitelmiin ambulanssien sijoituspaikkojen osalta.

Mallin toimivuutta joko sellaisenaan tai sitä edelleen kehittämällä voitaisiin myös tutkia laajemmin esimerkiksi säätilanteen, ajokelin ja vuorokausittaisen tarpeen sekä

ruuhkatilanteiden vaikutuksia ensihoidon kiinteiden sijoituspaikkojen järjestämisessä. Uusia kehitystarpeita syntyy, mikäli halutaan mallintaa useamman ambulanssin vaatimia suuronnettomuuksia ja ambulanssien reaaliaikaisten paikkatietojen hyväksikäyttämistä. Ambulanssien todellinen kuormitus ei voi olla 100 %, jotta apua tarvitsevalle on sitä aina saatavilla eli ambulansseja tulee olla myös joka hetki vapaana.

Kun ambulanssit suorittavat kiireellisiä ja kiireettömiä hoito- ja sairaankuljetustehtäviään, ovat ne merkittävän ajan muualla palvelualueellaan eivätkä valmiudessa asemapaikallaan. Ambulanssien dynaamiset sijoituspaikat ja yleensä liikkuvuuden huomioiminen mallinnuksessa ja optimoinnissa tarjoavat erittäin kiinnostan ja haastavan mahdollisuuden luoda jopa reaaliaikaisesti optimoitu ensihoidon palvelujärjestelmä.

LÄHTEET

- [1] Arola, S.: Ensihoito- ja sairaankuljetus Pohjois-Karjalan sairaanhoito- ja sosiaalipalvelujen kuntayhtymän alueella. Heinäkuu 2007. Viitattu 8.10.10.
http://www.kontiolahti.fi/fi/document.cfm?doc=show&doc_id=353
- [2] Castrén, A.: Paikkatietomenetelmät pelastustoimen riskianalyyssissä. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Maanmittaustieteiden laitos, Espoo, 2009.
- [3] CPLEX 12. Viitattu 25.10.2010.
<http://www.gams.com/dd/docs/solvers/cplex.pdf>
- [4] CPLEX Performance Tuning for Mixed Integer Programs. IBM. Viitattu 25.10.2010.
<http://www-01.ibm.com/support/docview.wss?uid=swg21400023>
- [5] Ehrgott M.: Multicriteria Optimization. Second Edition. Springer Berlin, 2005. Viitattu 2.12.2010.
<http://www.springerlink.com.ezproxy.utu.fi:2048/content/j45400/>
- [6] GAMS – A User’s Guide. Tutorial. Viitattu 25.10.2010.
<http://www.gams.com/dd/docs/bigdocs/GAMSUsersGuide.pdf>
- [7] GAMS/CPLEX Solver descriptions. Viitattu 25.10.2010.
<http://www.gams.com/solvers/solvers.htm#CPLEX>
- [8] GAMS Development Corporation: GAMS GDX facilities and tools, 4/16/2010. Viitattu 25.10.2010
<http://www.gams.com/dd/docs/tools/gdxutils.pdf>

- [9] GAMS Home Page. Viitattu 25.10.2010.
<http://www.gams.com/>
- [10] Hallituksen esitys Eduskunnalle terveydenhuoltolaiksi sekä laeiksi kansanterveyslain ja erikoissairaanhoidonlain muuttamiseksi sekä sosiaali- ja terveydenhuollon asiakasmaksuista annetun lain muuttamiseksi. HE 90/2010 vp. Viitattu 10.11.2010.
[http://www.eduskunta.fi/triphome/bin/thw/?\\${APPL}=akirjat&\\${BASE}=akirjat&\\${THWIDS}=0.39/1289278119_163684&\\${TRIPPIFE}=PDF.pdf](http://www.eduskunta.fi/triphome/bin/thw/?${APPL}=akirjat&${BASE}=akirjat&${THWIDS}=0.39/1289278119_163684&${TRIPPIFE}=PDF.pdf)
- [11] Hirvi, R.: Ensivaste osana päivystystä - Ensivasteen innovaatioita. Päivystys 2008 kongressi, Keski-Suomen pelastuslaitos. Viitattu 8.10.10.
<http://nova.ksshp.fi/Public/download.aspx?ID=14566&GUID=%7B7C1474FD-234D-40F5-B164-947BD8EE62CB%7D>
- [12] Heinonen J., Huikuri M., Linkosaari T., Pyhäranta M.: Satamatoimintojen mallintaminen. Turun yliopiston matematiikan laitoksen kurssi, mallinnusprojekti. Loppuraportti, 2009.
- [13] Huovinen M.: Optimointimallin muodostaminen – tapaus Turun saariston yhteysalusliikenne. Turun yliopisto, matematiikan laitos. Pro gradu – tutkielma, 2008
- [14] Ihamäki V-P.: Paikkatietojärjestelmien (GIS) käyttö palo- ja pelastustoimen yhteistoiminnan suunnittelussa. Pro gradu-tutkielma, Helsingin yliopisto, Maantieteen laitos, 1997. Viitattu 6.10.10.
<http://ethesis.helsinki.fi/julkaisut/mat/maant/pg/ihamaki/index.html>
- [15] Kamsula, P.: Paikkatietojen käyttö ensihoitopalvelujen suunnittelussa. Varsinais-Suomen Sairaanhoidopiiri, VEKSU-projekti, 2010.

- [16] Leipälä T.: Matemaattinen optimointi I. Luentomoniste, Turun yliopisto, hankittu 2010.
- [17] Leipälä T.: Matemaattinen optimointi II. Luentomoniste, Turun yliopisto, hankittu 2010.
- [18] Miettinen K.: Optimointi. Luentomoniste. Jyväskylän yliopisto, matematiikan laitos, Jyväskylä, 1998.
- [19] Model Types Description, Mixed Integer Programming. Viitattu 25.10.2010.
<http://www.gams.com/modtype/modeltyp.htm#MIP>
- [20] Pappinen, J.: Alueellinen ensihoitopalvelu – haaste ja mahdollisuus terveydenhuollon palvelujärjestelmälle. Sairaalaviesti 2/2009, 33–35. Viitattu 6.10.10.
<http://www.kunnat.net/attachment.asp?path=1;29;145;30546;5702;38885;11415;149975>
- [21] Pappinen J.: Ensihoitopalvelun mallintaminen Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin alueella 19.11.2009. TYKS-palaveriliite, Pauli Kamsula, 17.2.2010.
- [22] Pohjois-Savon TE-keskus, Teknologiayksikkö: Simulointi ja mallintamistyökalut sosiaali- ja terveydenhuollon kehittämisen välineinä. TYKS-palaveriliite, Pauli Kamsula, 17.2.2010.
- [23] Rardin R. L.: Optimization in Operations Research. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, United States of America, 1998, reprinted 2000.

- [24] Rosenthal, R. E.: A GAMS TUTORIAL. Viitattu 25.10.2010.
<http://www.gams.com/dd/docs/gams/Tutorial.pdf>
- [25] Ruohonen, T.: Erikoissairaanhoidon päivystyspoliklinikan simulointi. Licensiaattityö, Jyväskylän yliopisto, 2008. Viitattu 25.10.2010.
<https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/18326/9513923991.pdf?sequence=1>
- [26] Varsinais-Suomen Pelastuslaitos. Ensihoito ja sairastuneen kuljettaminen. Viitattu 6.10.10.
<http://www.turku.fi/Public/default.aspx?contentid=22710&nodeid=8625>
- [27] Varsinais-Suomen Pelastuslaitos: Palvelutasopäätös 2009–2012. Viitattu 8.10.10.
<http://www.turku.fi/Public/download.aspx?ID=76732&GUID={47E242E0-3CEA-4713-8AD3-F2876FE58331}>
- [28] Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin ensihoitopalvelun kokonaisuudistuksen suunnittelu (VEKSU)-projekti. Projektin nettisivut. Etusivu. Viitattu 6.10.10.
<http://veksu.fi/VEKSU.php>
- [29] Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin ensihoitopalvelun kokonaisuudistuksen suunnittelu (VEKSU)-projekti. Projektin nettisivut. Tavoitteet. Viitattu 6.10.10.
<http://veksu.fi/tavoitteet.php>

Liite 1 Ensihoitomallinnus: mallin GAMS-ohjelman listaus

```
$Title ensivaste-malli
*offlisting offuelxref offuellist offsymxref offsymlist

$Ontext

Mallissa lasketaan tarvittavien asemien paikat ja ambulanssimäärät
sekä
optimoidaan kustannukset halutun palvelupeaton mukaisesti

Syöttötiedot määritellään vastaavassa Excel-tiedostossa

Tulokset tulee edellämäinitun Excel-tiedoston Tuloksia-lehdille

$Offtext

$eolcom //

* Valitaan tehtävän ratkaisuksi Cplex:in toteutus.
Option MIP = Cplex;

*-----
-----
* Indeksit
* Lue luettavat indeksit excel-tilukosta.
$call      =gdxxrw.exe      i=ensihoito20.xls      Index=Index!a1
o=ensihoito20.gdx
$if errorlevel 1 $abort data extraction failed
$gdxin ensihoito20.gdx
Sets      a(*) "asemat"
          r(*) "karttaruutujen rivit"
          s(*) "karttaruutujen sarakkeet"
          p(*) "karttaruutujen painoarvo"
          kl(*) "kustannusten laatu"
          po(*) "prosentti_osuus_pisteet"
          pro(*) "prosenttiapuluvut";
$load a,r,s,p,kl,po,pro
$gdxin
*-----
-----
*Display a,r,s,p,kl,po,pro
*-----
-----
* Päätös- ja tilamuuttujat
Variables
          asemia      palvelukohdefunktion arvo (ambulanssiasemien
määrä)
          pp      palvelupeatokohdefunktion arvo
          x(a)      asema a(*) käytössä
          y(r,s)    ruudut r(*)s(*) joissa ei palvelua 1.kierros
          z(r,s)    ruudut r(*)s(*) joista voidaan vähentää palvelu 2.
kierros (apumuuttuja
```

```

*                kaikki ruudut, joissa ei palvelua on z.l(r,s) ja
j(r,s) yhdessä
      KoKust  kokonaiskustannukset kustannuskohdefunktion arvo
      KoKustPO                kokonaiskustannukset      ProsenttiOsuus
optimoinnissa kustannuskohdefunktion arvo
Free variable asemia,pp,KoKust,KoKustPO;
binary variable x,y,z;

```

```

*-----
-----

```

```

* ensivaste-mallin parametrit

```

```

* lue parametrit excel-taulukosta inc-tiedostoon
$call      =xls2gms      i=ensihoito20.xls      r0=Testi_demo!a1:n238
o=ensihoito20_params.inc
$include ensihoito20_params.inc

```

```

*Parametreja ovat siis:

```

```

*          PalveluAikaRaja eli "tavoiteltava palvelun aikaraja"
(tavoittamisviive),
*          aammin eli "tavoitteena olevien ambulanssiasemien
minimimäärä",
*          aamax eli "tavoitteena olevien ambulanssiasemien
maksimimäärä",
*          ak eli "yhden ambulanssin hoitokapasiteetti" (luku kuvaa
väestöpohjan
*          suuruutta, jonka yksi ambulanssi voi hoitaa),
*          Pros(po,pro) eli "prosenttiosuus" (kullakin
laskentakierroksella
*          tavoiteltava palvelupeittoprosentti),
*          Ku(a,kl) eli "kiinteät tai muuttuvat kustannukset"
(asemaa kohti sekä
*          ambulanssin kiinteät (auto + henkilöstöpalkat ym.) ja
muuttuvat
*          kustannukset (polttoaine, keli jne.) etäisyyden (eli
matka-ajan)
*          suhteen,
*          RuudunPaino(r,s,p) eli "ruudun paino väestömäärän ja
riskikertoimen
*          suhteen",
*          Etaisyys(r, s, a) eli "aseman (a) ja ruudun (r,s) etäisyys
aikayksiköissä"
*          (asema sijaitsee pienimmän arvon omaavassa ruudussa:
esimerkiksi
*          malliajossa, kun Etaisyys(r, s, a) =1).

```

```

*Display Etaisyys;

```

```

*Huom etäisyys on tässä jo aikayksiköissä

```

```

*-----
-----

```

```

*Mallin apuparametrit

```

```

Parameters ProsenttiOsuus;
Parameters Palvelee(a,r,s);
* määritetään mita ruutuja r(*),s(*) asema a(*) palvelee
Parameters Painokerroin(r,s);
* karttaruudun r(*),s(*) painokerroin
Parameters PalveleeYksin(a,r,s);
Parameters PalveleeKust(a,r,s);
Parameters PalveleeKustPO(a,r,s);
Parameters asemiakust;
Parameters asemiaI(a);
Parameters
Kustannus(a),AmbulanssienMaara(a),KokonaisKustannus,PalvelupeittoII
,KustannusII(a),
AmbulanssienMaaraII(a),KokonaisKustannusII,
AsemaKustannusMinimi(po,a),MinimiKustannus(po),RuudutIlmanPalveluaM
inimissa(po,r,s),
AsematMinimissa(po,a),AmbulanssitMinimissa(po,a),ProsenttiOsuusMini
missa(po)
PalveltavatRuudutMinimissa(po,a,r,s);
Parameters PalveleeEKA(a,r,s),PalveleeTOKA(a,r,s);
Parameters Prosentti;
Parameters i(r,s),ii(r,s),jj(po,r,s),j(r,s);
*i=määrä kuinka monta asemaa voi palvella kutakin ruutua;
*ii=määrä kuinka monta käyttöön otettavaa asemaa palvelee kutakin
ruutua;
*j=ruudut, joita ei voida palvella laskettavalla asemamäärällä jo
alunperin,
*kun otetaan Etaisyys huomioon;
*jj=ruudut, joita ei voida palvella laskettavalla asemamäärällä
tietyllä palvelupeitto
*prosentilla;
*-----
-----

* ensivaste-mallin apuparametrien alustus ja muokkaus

Palvelee(a,r,s)=0;
Palvelee(a,r,s)$(Etaisyys(r,s,a)<=PalveluAikaRaja)=1;
*Display Palvelee;

Painokerroin(r,s)=RuudunPaino(r,s,'vaestomaara')*RuudunPaino(r,s,'r
iskikerroin');
*Display Painokerroin;

*HUOM
PalveleeYksin(a,r,s)=0;
*PalveleeYksin(a,r,s)=Palvelee(a,r,s);
*Display PalveleeYksin;

*HUOM
PalveleeKust(a,r,s)=0;
*PalveleeKust(a,r,s)=Palvelee(a,r,s);
*Display PalveleeKust;

```

```

PalveleeKustPO(a,r,s)=Palvelee(a,r,s);
*Display PalveleeKustPO;

asemiakust=1;
*Display asemiakust;

asemiaI(a)=0;

Prosentti=20;
*Display Prosentti,Pros;

Alias(d,a);
Alias(e,a);

i(r,s)=0;
ii(r,s)=0;
jj(po,r,s)=1;
j(r,s)=1;

*-----
-----

* Mallin yhtalot

Equations palvelukohdefunktio          tarvittavien
asemapaikkojen yhteismäärä ottamatta huomioon ruutujen (rs)
painoarvoja saatikka ambulanssien max määrä rajoitteita
          palvelu          ruutua (rs)
palvelemaan kykenevät asemat a(*)
          palvelupeittokohdefunktio          palvelun peiton
arvo (0...100%)tietyllä ambulanssiasemien määrällä aamax
          palvelupeitto
ruutua(rs)palvelemaan kykenevät asemat a(*) ja palvelun puuttumisen
huomioonottaminen
          ambulanssiasemienmaara          ambulanssiasemien
määrätavoite
          ambulanssiasemia
kustannuslaskennassa asemien määrä
          asemien_kokonaiskustannus          asemien a(*)
aiheuttama KokonaisKustannus
          asemakohtainen_kustannus_optimointi
kustannusotimoinnissa jäljelle jääneiden asemien a(*) aiheuttamien
kustannusten minimointi
          palvelupeittovaatimus
kustannusotimoinnissa otetaan huomioon palvelupeittovaatimus
          palvelupeittovaatimus_optimointi
kustannusotimoinnissa otetaan huomioon palvelupeittovaatimus
minimoitu;

*I laskenta
palvelukohdefunktio..          asemia =e= sum( a, x(a) );
palvelu(r,s)..
sum(a,Palvelee(a,r,s)*x(a))=g=1;

*II laskenta

```



```

palvelupeittokohdefunktio..                                pp =e=100*(1-
(sum((r,s),Painokerroin(r,s)*y(r,s))/sum((r,s),Painokerroin(r,s))))
;
palvelupeitto(r,s)..
sum(a,(Palvelee(a,r,s)*x(a))+y(r,s)=g=1;
ambulanssiasemienmaara..                                sum(a,x(a))=l=aamax;

*III laskennassa lisäksi tarvittavia
ambulanssiasemia..                                    sum(a,x(a))=e=asemiakust;
palvelupeittovaatimus..                                ProsenttiOsuus =l=100*(1-
(sum((r,s),Painokerroin(r,s)*y(r,s))/sum((r,s),Painokerroin(r,s))))
;
asemien_kokonaiskustannus..
KoKust=e=sum(a,x(a)*sum((r,s),Painokerroin(r,s))/(sum((r,s),Palvelee(a,r,s)*Painokerroin(r,s))+
1)*(Ku(a,'kiinteat')+sum((r,s),Ku(a,'muuttuvat')*Palvelee(a,r,s)*Etaisyys(r,s,a)*Painokerroin(r,s))+sum((r,s),Round(0.4999+Painokerroin(r,s)*Palvelee(a,r,s)/ak))*Ku(a,'ambulanssi')));
*jos kaikkien asemien kustannus olisi sama, vain muuttuvilla kustannuksilla olisi merkitystä kun lasketaan tässä määrätyillä asemapaikkamäärillä
*kustannuksissa on painotusta:
* -käänteisluku aseman palveltavien ruutujen ja kokonaismäärän painokertoimien suhteesta
sum((r,s),Painokerroin(r,s))/(sum((r,s),Palvelee(a,r,s)*Painokerroin(r,s))+ 1)
*lisätty painoon +1, jotta ei tule 0:lla jakoa. Tulkitaan tämän tarkoittavan omaa ruutua.

* ALLA poistettu pyöristys ja sijoitettu 1-z oikeaan kohtaan
asemakohtainen_kustannus_optimointi..
KoKustPO=e=sum(a,x.l(a)*(Ku(a,'kiinteat')+sum((r,s),Ku(a,'muuttuvat')*(1-
z(r,s))*PalveleeKustPO(a,r,s)*Etaisyys(r,s,a)*Painokerroin(r,s))+sum((r,s),Painokerroin(r,s)*(1-
z(r,s))*PalveleeKustPO(a,r,s)/ak))*Ku(a,'ambulanssi')));
palvelupeittovaatimus_optimointi..                                ProsenttiOsuus =l=100*(1-
(sum((r,s),Painokerroin(r,s)*(z(r,s)+j(r,s)))/sum((r,s),Painokerroin(r,s))));
* EDELLÄ MUUTETTU z:n ja j:n summaksi
*-----
-----

* I laskenta
Model asemien_maara /
    palvelukohdefunktio
    palvelu
;/

Solve asemien_maara Minimizing asemia Using MIP;
asemiaI(a)=x.l(a);

* II laskenta
Model palvelu_peitto /

```

```

        palvelupeittokohdefunktio
        palvelupeitto
        ambulanssiasemienmaara
    /;

Solve palvelu_peitto Maximizing pp Using MIP;
Display x.l;
PalvelupeittoII=pp.l;

PalveleeYksin(a,r,s)=x.l(a)*Palvelee(a,r,s);
*alustus;
Display PalveleeYksin

*lisätään kustannuskerroin etäisyyteen
Loop (d,
Loop (e,
PalveleeYksin(d,r,s)$((x.l(d)*Ku(d,'muuttuvat')*Etaisyys(r,s,d)>x.l
(e)*Ku(e,'muuttuvat')*Etaisyys(r,s,e) AND x.l(d)=1 AND x.l(e)=1)
AND sum(a,PalveleeYksin(a,r,s))>1)=0;
);
);
Display PalveleeYksin,x.l;

*lisätään kustannuskerroin etäisyyteen
*kun monen etäisyys on smin kokoinen
Loop (d,
Loop (e,
PalveleeYksin(d,r,s)$((x.l(d)*Ku(d,'muuttuvat')*Etaisyys(r,s,d)=x.l
(e)*Ku(e,'muuttuvat')*Etaisyys(r,s,e) AND x.l(d)=1 AND x.l(e)=1)
AND sum(a,PalveleeYksin(a,r,s))>1)=0;
);
);
Display PalveleeYksin;

KustannusII(a)=0;
AmbulanssienMaaraII(a)=0;
AmbulanssienMaaraII(a)=round(0.4999+((sum((r,s),(Painokerroin(r,s)*
PalveleeYksin(a,r,s)*x.l(a))))/ak));
KustannusII(a)$ (AmbulanssienMaaraII(a)<>0 AND
x.l(a)=1)=Ku(a,'kiinteat')+sum((r,s),Ku(a,'muuttuvat')*PalveleeYksi
n(a,r,s)*Etaisyys(r,s,a)*Painokerroin(r,s))+AmbulanssienMaaraII(a)*
Ku(a,'ambulanssi');
KokonaisKustannusII=sum(a,x.l(a)*KustannusII(a));

*MinimiKustannus_PalveluMax=KokonaisKustannusII;
*tämä antaa erään minimikustannusrajan

Display AmbulanssienMaaraII,KustannusII,KokonaisKustannusII

* III laskenta
Model kustannusten_optimointi /
    ambulanssiasemia
    palvelupeittovaatimus
    palvelupeitto
    asemien_kokonaiskustannus
    /;

```

```

kustannusten_optimointi.optfile=1;

Model kustannusten_optimointi_peitto /
    palvelupeittovaatimus_optimointi
    asemakohtainen_kustannus_optimointi
*jätetään ekan kierroksen y.l huomioimatta ja optimoidaan uudestaan
/;
kustannusten_optimointi_peitto.optfile=1;

MinimiKustannus(po)=1;
*arvo 1, koska ei suppenevissa ratkaisuisa syntyy minimikustannus
= 0
Kustannus(a)=0;
AmbulanssienMaara(a)=0;
RuudutIlmanPalveluaMinimissa(po,r,s)=0;
PalveltavatRuudutMinimissa(po,a,r,s)=0;
AsematMinimissa(po,a)=0;
AsemaKustannusMinimi(po,a)=0;
AmbulanssitMinimissa(po,a)=0;
ProsenttiOsuusMinimissa(po)=0;

Loop (po,

ProsenttiOsuus=Pros(po,'prosentti');

For (asemiakust = aamin to aamax,

Solve kustannusten_optimointi Minimizing KoKust Using MIP;
*LISATTY
PalveleeKust(a,r,s)=0;
*EDELLÄ
PalveleeKust(a,r,s)=x.l(a)*Palvelee(a,r,s);
Display x.l,x.m,KoKust.l,y.l,y.m;
i(r,s)=sum(e,Palvelee(e,r,s));
ii(r,s)=sum(e,x.l(e)*Palvelee(e,r,s));
Display i,ii;

*Seuraavalla ehdolla pyritään poistamaan väärät etenemiset
ratkaisemattomien tilanteiden pohjalta
IF (sum(a,x.l(a))<>asemiakust,
x.l(a)=0;
);

*lisätään kustannuskerroin etäisyyteen
Loop (d,
Loop (e,
PalveleeKust(d,r,s)$((x.l(d)*Ku(d,'muuttuvat')*Etaisyys(r,s,d))>x.l(
e)*Ku(e,'muuttuvat')*Etaisyys(r,s,e) AND x.l(d)=1 AND x.l(e)=1) AND
sum(a,PalveleeKust(a,r,s))>1)=0;
*Huom yllä verrataan käyttöönottettujen asemien etäisyyksiä, ei
kaikkien
);
);
*kun monen etäisyys on smin kokoinen
*lisätään kustannuskerroin etäisyyteen
Loop (d,

```

```

Loop (e,
PalveleeKust(d,r,s)$((x.l(d)*Ku(d,'muuttuvat')*Etaisyys(r,s,d)=x.l(
e)*Ku(e,'muuttuvat')*Etaisyys(r,s,e) AND x.l(d)=1 AND x.l(e)=1) AND
sum(a,PalveleeKust(a,r,s))>1)=0;
);
);
PalveleeKustPO(a,r,s)=PalveleeKust(a,r,s);
Display PalveleeKustPO;

j(r,s)=1;
jj(po,r,s)=1;
Loop (e,
jj(po,r,s)$ (x.l(e)=1 AND Palvelee(e,r,s)=1)=0;
);
j(r,s)=jj(po,r,s);
PalveleeKustPO(a,r,s)=PalveleeKustPO(a,r,s)-
j(r,s)*PalveleeKustPO(a,r,s);

PalveleeEKA(a,r,s)=PalveleeKustPO(a,r,s);
Display PalveleeEKA;

Solve kustannusten_optimointi_peitto Minimizing KoKustPO Using MIP;
Display PalveleeKustPO,KokustPO.l;
PalveleeKustPO(a,r,s)=PalveleeKustPO(a,r,s)-
(z.l(r,s))*PalveleeKustPO(a,r,s);

PalveleeTOKA(a,r,s)=PalveleeKustPO(a,r,s);
Display PalveleeTOKA;

Display j,PalveleeKust,PalveleeKustPO;
Display asemiakust,x.l,Kokust.l,KoKustPO.l;

Kustannus(a)=0;
AmbulanssienMaara(a)=0;

*LISATTY EHTO
AmbulanssienMaara(a)$ (x.l(a)=1)=round(0.4999+((sum((r,s),(Painokerr
oin(r,s)*PalveleeKustPO(a,r,s)*x.l(a)))/ak));
Kustannus(a)$ (AmbulanssienMaara(a)<>0 AND
x.l(a)=1)=Ku(a,'kiinteat')+sum((r,s),Ku(a,'muuttuvat')*PalveleeKust
PO(a,r,s)*Etaisyys(r,s,a)*Painokerroin(r,s))+AmbulanssienMaara(a)*K
u(a,'ambulanssi');
KokonaisKustannus=sum(a,x.l(a)*Kustannus(a));

ii(r,s)=sum(e,x.l(e)*PalveleeKustPO(e,r,s));

If ((KokonaisKustannus<=MinimiKustannus(po) OR
MinimiKustannus(po)=1) AND KokonaisKustannus<>0,
MinimiKustannus(po)=KokonaisKustannus;
* MUUTETTU ALLA sulut
RuudutIlmanPalveluaMinimissa(po,r,s)=(j(r,s) OR z.l(r,s));
* RuudutIlmanPalveluaMinimissa(po,r,s)=j(r,s) OR z.l(r,s);
* j(r,s) tulee ottaa huomioon, koska jätetään ekan
kierroksen y.l huomioimatta ja optimoidaan uudestaan

```

```

PalveltavatRuudutMinimissa(po,a,r,s)=PalveleeKustPO(a,r,s);
  AsematMinimissa(po,a)=x.l(a);
  AsemaKustannusMinimi(po,a)=x.l(a)*Kustannus(a);
  AmbulanssitMinimissa(po,a)=AmbulanssienMaara(a);
  ProsenttiOsuusMinimissa(po)$ (sum(a,x.l(a)>0))=100*(1-
(sum((r,s),Painokerroin(r,s)*(z.l(r,s)))/sum((r,s),Painokerroin(r,s)
)))-
(sum((r,s),Painokerroin(r,s)*j(r,s))/sum((r,s),Painokerroin(r,s)))
);
*           j(r,s) tulee ottaa huomioon, koska jätetään ekan
kierroksen y.l huomioimatta ja optimoidaan uudestaan
);

Display AmbulanssienMaara,Kustannus,KokonaisKustannus;
Display
asemiakust,x.l,y.l,z.l,j,ii,Kokust.l,PalveleeKust,PalveleeKustPO,Mini
nimiKustannus,RuudutIlmanPalveluaMinimissa,AsematMinimissa,Ambulans
sitMinimissa,ProsenttiOsuusMinimissa;

);
);

Display
AsemaKustannusMinimi,RuudutIlmanPalveluaMinimissa,AsematMinimissa,A
mbulanssitMinimissa,ProsenttiOsuusMinimissa,MinimiKustannus;

* Kirjoittaa tulokset exceliin
execute_unload
'ensihoito20.gdx',asemiaI,PalvelupeittoII,AmbulanssienMaaraII,Kokon
aisKustannusII,
      AsemaKustannusMinimi,RuudutIlmanPalveluaMinimissa,
AsematMinimissa,AmbulanssitMinimissa,ProsenttiOsuusMinimissa,Minimi
Kustannus,
      Palvelee,PalveltavatRuudutMinimissa;
$onecho > temp.txt

par=asemiaI           rng=TuloksiaI!c8 rdim=1 cdim=0
par=PalvelupeittoII   rng=TuloksiaII!c8 rdim=0 cdim=0
par=KokonaisKustannusII   rng=TuloksiaII!e8 rdim=0 cdim=0
par=AmbulanssienMaaraII   rng=TuloksiaII!g8 rdim=1 cdim=0

par=MinimiKustannus    rng=Tuloksia1!c8 rdim=1 cdim=0
par=ProsenttiOsuusMinimissa    rng=Tuloksia1!f8 rdim=1 cdim=0
par=AmbulanssitMinimissa    rng=Tuloksia1!i7 rdim=1 cdim=1
par=AsemakustannusMinimi    rng=Tuloksia2!a8 rdim=1 cdim=1
par=RuudutIlmanPalveluaMinimissa    rng=Tuloksia3!a8 rdim=1 cdim=2
par=Palvelee           rng=Tuloksia4!a8 rdim=2 cdim=1
par=PalveltavatRuudutMinimissa    rng=Tuloksia5!a8 rdim=2 cdim=2

$offecho
execute 'gdxrw.exe i=ensihoito20.gdx @temp.txt o=ensihoito20.xls
';

execute 'shellexecute ensihoito20.xls'

```

Liite 2 Ensimmäisen ensihoitoesimerkin sivuja tiedostosta ensihoito20.xls

asemat	ruutu_rivit	ruutu_sarakkeet	ruudunpaino	kustannusten_laatu	prosentti_osuus_pisteet	prosentit
1	r1	s1	vaestomaara	kiinteat	po20	prosentti
2	r2	s2	riskikerroin	muuttuvat	po40	prosentti2
3	r3	s3		ambulanssi	po60	
4	r4	s4			po80	
5	r5	s5			po100	
6	r6	s6				
7		s7				
8						

* ensivaste mallia

Parameters PalveluAikaRaja on tavoiteltava palvelun aikaraja =/
5

/;
Parameters aammin Tavoitteena olevien ambulanssiasemien minimimäärä =/
1

/;
Parameters aamax Tavoitteena olevien ambulanssiasemien maksimimäärä =/
5

/;
Parameters ak yhden ambulanssin hoitokapasiteetti (luku kuvaa väestöpohjan suuruutta) =/
1000

Table Pros(po,pro) loopattava prosenttiosuus pareto frontier pisteiden hakemiseksi

	prosentti	prosentti2
po20	20	100
po40	40	100
po60	60	100
po80	80	100
po100	100	100

Table Ku(a,kl) kiinteät kustannukset per asema sekä ambulanssin kiinteät (auto + henkilöstöpalkat ym) ja muuttuvat-kerroin esim matk-ajat keli jne ajasta riippuva kerroin

	kiinteät	muuttuvat	ambulanssi
1	3000	10	1000
2	3000	10	1000
3	3000	10	1000
4	3000	10	1000
5	3000	10	1000
6	3000	10	1000
7	3000	10	1000
8	3000	10	1000

Table RuudunPaino(r,s,p) ruudun paino väestömäärän ja riskikertoimen suhteen

		vaestomaara	riskikerroin
r1	.s1	100	2
r1	.s2	50	1
r1	.s3	100	1
r1	.s4	50	1
r1	.s5	100	1
r1	.s6	50	2
r1	.s7	100	2
r2	.s1	100	1
r2	.s2	50	2
r2	.s3	100	2
r2	.s4	50	1
r2	.s5	100	1
r2	.s6	50	1
r2	.s7	100	1
r3	.s1	100	1
r3	.s2	50	1
r3	.s3	100	1
r3	.s4	50	2
r3	.s5	100	2
r3	.s6	50	1
r3	.s7	100	1
r4	.s1	100	2
r4	.s2	50	1
r4	.s3	100	1
r4	.s4	50	1
r4	.s5	100	1
r4	.s6	50	2
r4	.s7	100	2
r5	.s1	100	1
r5	.s2	50	2
r5	.s3	100	2
r5	.s4	50	1
r5	.s5	100	1
r5	.s6	50	1
r5	.s7	100	1
r6	.s1	100	1
r6	.s2	50	1
r6	.s3	100	1
r6	.s4	50	2
r6	.s5	100	2
r6	.s6	50	1
r6	.s7	100	1

Table Etäisyys(r,s,a) aseman a ja ruudun ruutu(rs) etäisyys aikayksiköissä (asema sijaitsee pienimmän arvon ruudussa - tässä kun arvo 1)

		1	2	3	4	5	6	7	8
r1	.s1	1	1	7	6	11	12	10	16
r1	.s2	2	2	6	5	10	11	9	15
r1	.s3	3	3	5	4	9	10	8	14
r1	.s4	4	4	4	5	8	9	7	13
r1	.s5	5	5	3	6	7	8	8	12
r1	.s6	6	6	2	7	6	7	9	11
r1	.s7	7	7	3	8	5	6	10	10
r2	.s1	2	2	6	5	10	11	9	15
r2	.s2	3	3	5	4	9	10	8	14
r2	.s3	4	4	4	3	8	9	7	13
r2	.s4	5	5	3	4	7	8	6	12
r2	.s5	6	6	2	5	6	7	7	11
r2	.s6	7	7	1	6	5	6	8	10
r2	.s7	8	8	2	7	4	5	9	9
r3	.s1	3	3	7	4	9	10	8	14
r3	.s2	4	4	6	3	8	9	7	13
r3	.s3	5	5	5	2	7	8	6	12
r3	.s4	6	6	4	3	6	7	5	11
r3	.s5	7	7	3	4	5	6	6	10
r3	.s6	8	8	2	5	4	5	7	9
r3	.s7	9	9	3	6	3	4	8	8
r4	.s1	4	4	8	3	8	9	7	13
r4	.s2	5	5	7	2	7	8	6	12
r4	.s3	6	6	6	1	6	7	5	11
r4	.s4	7	7	5	2	5	6	4	10
r4	.s5	8	8	4	3	4	5	5	9
r4	.s6	9	9	3	4	3	4	6	8
r4	.s7	10	10	4	5	2	3	7	7
r5	.s1	5	5	9	4	9	10	6	12
r5	.s2	6	6	8	3	8	9	5	11
r5	.s3	7	7	7	2	7	8	4	10
r5	.s4	8	8	6	3	6	7	3	9
r5	.s5	9	9	5	4	5	6	4	8
r5	.s6	10	10	4	5	4	5	5	7
r5	.s7	11	11	5	6	3	4	6	6
r6	.s1	6	6	10	5	10	11	5	11
r6	.s2	7	7	9	4	9	10	4	10
r6	.s3	8	8	8	3	8	9	3	9
r6	.s4	9	9	7	4	7	8	2	8
r6	.s5	10	10	6	5	6	7	3	7
r6	.s6	11	11	5	6	5	6	4	6
r6	.s7	12	12	6	7	4	5	5	5

	<u>MinimiKustannus</u>	<u>ProsenttiOsuus</u>	<u>AmbulanssienMäärä eri asemilla</u>			
	Palveluprosentin funtiona	Palveluprosentin funtiona	2	3	4	5
20	po20 25500	po20 20,45455	1	1		
40	po40 50500	po40 40,90909	1	1	1	
60	po60 76500	po60 60,22727	1	2	1	
80	po80 106000	po80 80,68182	1	1	2	1
100	po100 144500	po100 100	1	1	3	1

Liite 3 Toisen ensihoitoesimerkin sivuja tiedostosta ensihoito20_heli.xls

asemat	ruutu_rivit	ruutu_sarakkeet	ruudunpaino	kustannusten_laatu	prosentti_osuus_pisteet	prosentit
1	r1	s1	vaestomaara	kiinteat	po20	prosentti
2	r2	s2	riskikerroin	muuttuvat	po40	prosentti2
3	r3	s3		ambulanssi	po60	
4	r4	s4			po80	
5	r5	s5			po100	
6	r6	s6				
7		s7				
8						

* ensivaste mallia

Parameters PalveluAikaRaja on tavoitettava palvelun aikaraja =/

5

/; Parameters aamin Tavoitteena olevien ambulanssiasemien minimimäärä =/

1

/; Parameters aamax Tavoitteena olevien ambulanssiasemien maksimimäärä =/

5

/; Parameters ak yhden ambulanssin hoitokapasiteetti (luku kuvaa väestöpohjan suuruutta) =/

1000

Table Pros(po,pro) loopattava prosenttiosuus pareto frontier pisteiden hakemiseksi

	prosentti1	prosentti2
po20	20	100
po40	40	100
po60	60	100
po80	80	100
po100	100	100

Table Ku(a,k) kiinteät kustannukset per asema sekä ambulanssin kiinteät (auto + henkilöstöpalkat ym) ja muuttuvat-kerroin esim matk-ajat keli jne ajasta riippuva kerroin

	kiinteät	muuttuvat	ambulanssi
1	3000	100	10000
2	3000	10	1000
3	3000	10	1000
4	3000	10	1000
5	3000	10	1000
6	3000	10	1000
7	3000	10	1000
8	3000	10	1000

Table RuudunPaino(r,s,p) ruudun paino väestömäärän ja riskikertoimen suhteen

		vaestomaara	riskikeroiin
r1	.s1	100	2
r1	.s2	50	1
r1	.s3	100	1
r1	.s4	50	1
r1	.s5	100	1
r1	.s6	50	2
r1	.s7	100	2
r2	.s1	100	1
r2	.s2	50	2
r2	.s3	100	2
r2	.s4	50	1
r2	.s5	100	1
r2	.s6	50	1
r2	.s7	100	1
r3	.s1	100	1
r3	.s2	50	1
r3	.s3	100	1
r3	.s4	50	2
r3	.s5	100	2
r3	.s6	50	1
r3	.s7	100	1
r4	.s1	0	2
r4	.s2	0	1
r4	.s3	100	1
r4	.s4	50	1
r4	.s5	100	1
r4	.s6	50	2
r4	.s7	100	2
r5	.s1	100	1
r5	.s2	0	2
r5	.s3	0	2
r5	.s4	50	1
r5	.s5	100	1
r5	.s6	50	1
r5	.s7	100	1
r6	.s1	100	1
r6	.s2	50	1
r6	.s3	0	1
r6	.s4	50	2
r6	.s5	100	2
r6	.s6	50	1
r6	.s7	100	1

Table Etäisyys(r, s, a) aseman a ja ruudun ruutu(rs) etäisyys aikayksiköissä (asema sijaitsee pienimmän arvon ruudussa - tässä kun arvo 1)

		1	2	3	4	5	6	7	8
r1	.s1	1	2	3	4	5	6	7	8
r1	.s2	1,2	2	6	5	11	12	10	16
r1	.s3	1,4	3	5	4	10	11	9	15
r1	.s4	1,6	4	4	5	8	10	8	14
r1	.s5	1,8	5	3	6	7	8	8	12
r1	.s6	2	6	2	7	6	7	9	11
r1	.s7	2,2	7	3	8	5	6	10	10
r2	.s1	1,2	2	6	5	10	11	9	15
r2	.s2	1,4	3	5	4	9	10	8	14
r2	.s3	1,6	4	4	3	8	9	7	13
r2	.s4	1,8	5	3	4	7	8	6	12
r2	.s5	2	6	2	5	6	7	7	11
r2	.s6	2,2	7	1	6	5	6	8	10
r2	.s7	2,4	8	2	7	4	5	9	9
r3	.s1	1,4	3	7	4	9	10	8	14
r3	.s2	1,6	4	6	3	8	9	7	13
r3	.s3	1,8	5	5	2	7	8	6	12
r3	.s4	2	6	4	3	6	7	5	11
r3	.s5	2,2	7	3	4	5	6	6	10
r3	.s6	2,4	8	2	5	4	5	7	9
r3	.s7	2,6	9	3	6	3	4	8	8
r4	.s1	1,6	8	12	8	13	14	12	18
r4	.s2	1,8	9	11	6	11	12	10	16
r4	.s3	2	6	6	1	6	7	5	11
r4	.s4	2,2	7	5	2	5	6	4	10
r4	.s5	2,4	8	4	3	4	5	5	9
r4	.s6	2,6	9	3	4	3	4	6	8
r4	.s7	2,8	10	4	5	2	3	7	7
r5	.s1	1,8	9	13	12	15	16	14	20
r5	.s2	2	14	16	11	16	17	13	19
r5	.s3	2,2	11	11	6	11	12	8	14
r5	.s4	2,4	8	6	3	6	7	3	9
r5	.s5	2,6	9	5	4	5	6	4	8
r5	.s6	2,8	10	4	5	4	5	5	7
r5	.s7	3	11	5	6	3	4	6	6
r6	.s1	2	10	14	11	14	15	9	15
r6	.s2	2,2	15	17	10	13	14	8	14
r6	.s3	2,4	12	12	9	12	13	7	13
r6	.s4	2,6	9	7	4	7	8	2	8
r6	.s5	2,8	10	6	5	6	7	3	7
r6	.s6	3	11	5	6	5	6	4	6
r6	.s7	3,2	12	6	7	4	5	5	5

	<u>MinimiKustannus</u>	<u>ProsenttiOsuus</u>	<u>AmbulanssienMäärä eri asemilla</u>				
	Palveluprosentin funtiona	Palveluprosentin funtiona	1	2	3	4	5
20	po20 20500	po20 20	po20	1	1		
40	po40 43000	po40 40	po40	1	1		
60	po60 67000	po60 60	po60	1	2	1	
80	po80 92000	po80 80	po80	1	1	1	1
100	po100 177500	po100 100	po100	1	1	1	2