

POISTUMISAIKALASKELMAT PALOTILANTEISSA

Timo Korhonen, Simo Hostikka ja Olavi Keski-Rahkonen
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
PL 1803, 02044 VTT

Tiivistelmä

Tässä artikkelissa esitellään uusi poistumisajan laskentamenetelmä (työnimi FdsEvac), joka mahdollistaa paniikkiolosuhteiden mallintamisen sekä poistumisaikasimulaation ja tämän hetkistä huipputasoa edustavan FDS-palonsimulointiohjelman keskinäisen vuorovaikutuksen. FdsEvacin pääpiirteet sekä ensimmäiset alustavat tulokset esitellään. Menetelmän nähtiin toimivan tyydyttävästi ja riittävän nopeasti käytännön sovelluksia ajatellen. Vertailtaessa FdsEvacin antamia tuloksia Simulex- ja buildingExodus-ohjelmien tuloksiin kahdessa testitilanteessa kolmesta tulokset olivat yhteneväisiä, kun taas yhdessä tilanteessa, jossa oli ahtautunut käytävä, eri menetelmien antamat tulokset erosivat toisistaan huomattavasti.

JOHDANTO

Tulipalotilanteessa tapahtuvan ihmisten poistumisen simuloinnin historia on pitkä, mutta se voidaan tiivistää lyhyesti viittaamalla Safety Science –sarjajulkaisun erityisnumeroon (Vol. 18, nro 4, 1995), missä useat artikkelit, etenkin Smithin [1] sekä Thompsonin ja Marchantin [2], luovat selkeän katsauksen alan sen hetkiseen tilanteeseen. Hieman myöhemmin Sime [3] painotti, että kokonaisvaltainen väkijoukon turvallisuussuunnittelu, hallinta ja riskin arviointi vaatii insinöörimäisen ja psykologisen lähestymistavan yhdistämistä. Sen jälkeiset poistumisaikasimulointien kehityksen suunnat kuvataan kymmeneltä viime vuodelta kattavasti kahdessa International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics –kokousten julkaisuissa olevissa artikkeleissa [4, 5].

Monista varotoimenpiteistä huolimatta suurpaloja ja muita suuria onnettomuuksia voi esiintyä rakennetussa ympäristössä. Tehokkaita toimenpiteitä tarvitaan tasapainottamaan lisääntyntä riskiä. Rakennusten ja teollisuuskohteiden koko sekä ihmismäärät ovat suurentuneet melkoisesti. Riski kasvaa potenssifunktiona yksikön koon kasvaessa. Funktion eksponentti on haarukassa 1...2, joten koon kaksinkertaistuessa riski kasvaa tekijällä 2...4. Koska ihmisillä ei voida tehdä massiivisia kokeita, mallinnus ja numeerinen simulointi ovat harvoja keinoja hallita näitä ongelmia rationaalisesti. Tulipalojen simulointi on yleisesti käytetty menetelmä laajojen rakennuskohteiden, kuten kauppakeskusten, suurten kokoontumistilojen ja teollisuuslaitosten, turvallisuussuunnittelussa. Suurten rakennuksien toiminnallisessa mitoituksessa kenttämallit ovat jo korvanneet vyöhykemallit. Liittämällä poistumislaskenta samaan laskennalliseen alustaan antaa mahdollisuuden tulipalon ja poistuvien ihmisten vuorovaikutteisen laskennan. Sen jälkeen seuraava askel on poistumiseen liittyvien todennäköisyyksien laskenta Monte Carlo -tekniikalla.

Tyypillisin lähtökohta ihmisten poistumisen laskennan malleille on ihmisvirtauksen analogia nestevirtauksen kanssa. Se on tyydyttävä lähtökohta jouhevalle virtaukselle ja toimiva perusta monille muillekin lähestymistavoille. Sillä on kuitenkin epäkohtia kriittisissä tilanteissa, koska nesteeseen ei synny paikallisia painepiikkejä taikka ahtaumia. Nämä ovat tilanteita,

joissa ihmisten virratessa pahimmissa tapauksissa voisi esiintyä suuria tappioita. Monenkappaleen fysiikan teoriasta lainatun rakeisen aineen virtauksen käyttäminen nestevirtauksen sijasta antoi hedelmällisen rinnastuksen [6, 7, 8]. Helbingin ryhmä [9, 10] esitti tämän analogian pohjalta uuden poistumismallin, joka toimii myös paniikkitilanteissa. Siinä ihmisiä kuvataan tasossa liikkuvina yksittäisinä hiukkasina, jotka ottavat huomioon seinät ja välttävät liian läheistä etäisyyttä toisiin henkilöihin. Ihmiset liikkuvat mekaniikan lakien mukaan, mutta käyttävät lisäksi näköaistia liikkumisensa ohjailuun. Sosiaalinen voima [11, 12] lisättiin malliin ottamaan tämä huomioon. Näin Simen [3] painottamia psykologisia seikkoja saatiin mukaan mekaanisesti. Toisin kuin mekaniikasta, tästä alueesta on vielä niukasti tutkimustietoa. Koska ihminen tunnetusti myös muuttaa päätöksensä melko nopeasti, tästä aiheutuvat ilmiöt ovat keskeisiä kehittäelykohteita ja uusien kokeiden suunnittelu työssämmekin painottuu niihin.

POISTUVIEN IHMISTEN LIIKKEEN MALLINTAMINEN

Tässä työssä valittiin ihmisten liikkeen mallintamisen lähtökohdaksi Helbingin ryhmän kehittämä menetelmä. Se esitellään lyhyesti alla, täydellisemmän kuvauksen siitä saa julkaisuista [6, 7, 8, 9] ja niissä olevista viittauksista.

Helbingin mallissa poistuvan henkilön liikettä seurataan mekaniikan lakien mukaan. Kullekin henkilölle muodostetaan oma liikeyhtälö, jota hän seuraa poistumisen aikana:

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{x}_i(t)}{dt^2} = \mathbf{f}_i(t) + \xi_i(t) , \quad (1)$$

missä $\mathbf{x}_i(t)$ on henkilön i paikka hetkellä t , $\mathbf{f}_i(t)$ on summa ympäristön kyseiseen henkilöön kohdistamista voimista, m_i on henkilön massa ja viimeinen termi, $\xi_i(t)$, on pieni satunnainen voima. Henkilön nopeus kullakin ajan hetkellä, $\mathbf{v}_i(t)$, saadaan lausekkeesta $d\mathbf{x}_i/dt$.

Henkilöön kohdistuva voima koostuu monesta eri komponentista:

$$\mathbf{f}_i = \frac{m_i}{\tau_i} (\mathbf{v}_i^0 - \mathbf{v}_i) + \sum_{i \neq j} (\mathbf{f}_{ij}^{soc} + \mathbf{f}_{ij}^{att} + \mathbf{f}_{ij}^{ph}) + \sum_b \mathbf{f}_{ib} + \sum_k \mathbf{f}_{ik}^{att} , \quad (2)$$

missä \mathbf{f}_{ib} kuvaa henkilöön seinien väistelystä aiheutuvaa voimaa, termillä \mathbf{f}_{ik}^{att} voidaan tarvittaessa kuvata muita henkilön ja ympäristön välisiä vuorovaikutuksia; tämä voima saa henkilön pakenemaan tai väistämään esimerkiksi tulen ja savun uhkaa. Voimalausekkeen kaksoissummalla kuvataan eri henkilöiden väliset vuorovaikutukset. Voimalausekkeen ensimmäinen termi pyrkii ohjaamaan henkilön nimellinopeudella poistumisreittiä pitkin ulos.

Henkilöiden välinen vuorovaikutus jaetaan kolmeen osaan. Sosiaaliselle voimatermille \mathbf{f}_{ij}^{soc} käytetään tässä työssä Helbingin ym. [7] esittämää lauseketta

$$\mathbf{f}_{ij}^{soc} = A_i e^{-(r_{ij}-d_{ij})/B_i} \left(\lambda_i + (1-\lambda_i) \frac{1+\cos \varphi_{ij}}{2} \right) \mathbf{n}_{ij} , \quad (3)$$

missä r_{ij} on ihmisiä kuvaavien ympyröiden keskipisteiden välinen etäisyys, d_{ij} on näiden ympyröiden säteiden summa, yksikkövektori \mathbf{n}_{ij} osoittaa henkilöstä j henkilöön i ja parametrilla λ_i voidaan säädellä kulmariippuvuuden voimakkuutta. Kulma φ_{ij} on voiman kohteena olevan henkilön nopeusvektorin ja tämän repulsiivisen voiman aiheuttavan henkilön suunnan välinen kulma. Eri vakioille on havainnoista määritelty jonkinlaisia arvoja, mutta tarkempi arviointi vaatii vieläkin mittauksia. Voimatermi \mathbf{f}_{ij}^{ph} kuvaa henkilöiden välisiä fysikaalisia kosketusvoimia ja niille käytetään lauseketta

$$\mathbf{f}_{ij}^{ph} = k(d_{ij} - r_{ij})\mathbf{n}_{ij} + \kappa(d_{ij} - r_{ij})\Delta v_{ij}^t \mathbf{t}_{ij}, \quad (4)$$

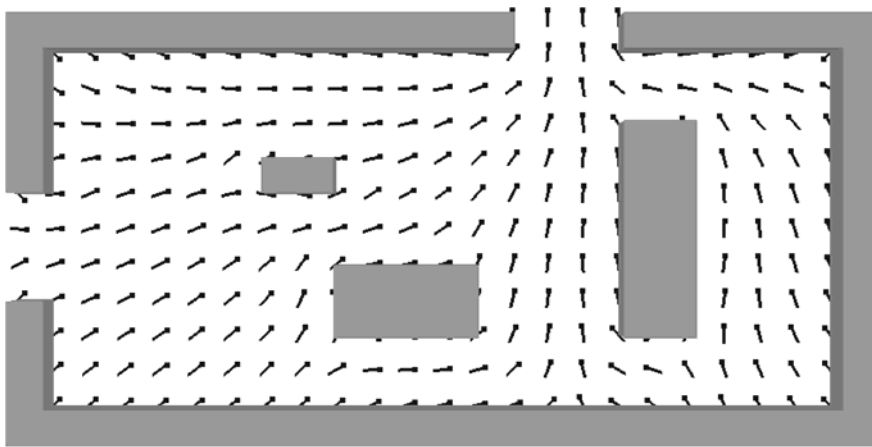
missä Δv_{ij}^t on kosketuksissa olevien henkilöiden tangenciaalisten nopeuksien erotus ja vektori \mathbf{t}_{ij} on toisiaan koskettavien henkilöitä kuvaavien ympyröiden tangenciaalinen yksikkövektori. Tämä voimatermi esiintyy siis vain silloin, kun henkilöitä kuvaavat ympyrät koskettavat toisiaan eli kun $d_{ij} - r_{ij} \geq 0$. Voimatermiä \mathbf{f}_{ij}^{att} voidaan tarvittaessa käyttää kuvaamaan muita henkilöiden välisiä vuorovaikutuksia, kuten laumakäyttäytymistä tai perheenjäsenten välisiä vuorovaikutuksia. Tätä termiä voitaisiin myös käyttää muodostamaan henkilöpareja, esimerkiksi kuvaamaan rakennuksen sisällä kulkevaa kahdesta palomiehestä muodostuvaa sammutusparia.

Yhtälön (2) oikean puolen ensimmäinen termi kuvaa poistuvaa henkilöä ohjaavaa voimaa. Jokainen poistuva henkilö pyrkii kävelemään hänelle tyypillisellä kävelynopeudella $|\mathbf{v}_i^0|$ kohti poistumisovea tai jotain muuta vastaavaa kohdetta. Kullakin henkilöllä on oma aikavakionsa τ_i , joka kuvaa esteettömästi liikkuvan henkilön itsensä aiheuttaman suunnan ja vauhdin muutokseen liittyvää hitautta. Tässä työssä tälle aikavakionle käytettiin arvoja 0,5 s lähimailta. Poistuva ihminen pyrkii siis seuraamaan poistumisovellet reittiä, jonka suunnan antaa halutun kävelynopeuden kenttä \mathbf{v}_i^0 . Nyt esiteltävän menetelmän uutuutena on tämän haluttu kävelynopeuskentän muodostaminen. Tässä työssä se muodostetaan käyttämällä FDS-palonsimulointiohjelmaa [13] ja sen virtausratkaisijaa.

Käyttämällä FDS-palonsimulointiohjelmaa alustana, jonka päälle poistumisaikalaskenta FdsEvac mallissa asennetaan, päästään kaikkiin paloon liittyviin paikallisiin suureisiin suoraan ja helpposti käsiksi. Esimerkiksi kaasun lämpötilaa, savun ja eri kaasujen pitoisuuksia sekä säteilytasoja voidaan käyttää muuttamaan poistuvien henkilöiden käyttäytymistä ja ominaisuuksia. Tulipalo vaikuttaa poistumisympäristöön, se voi lamaannuttaa ihmisiä ja se voi jopa tukkia poistumisteitä. Toisaalta poistuvat ihmiset voivat vaikuttaa tulipalon kehittymiseen liittyviin tekijöihin joko suoraan sammuttamalla tai avaamalla ja sulkemalla ovia tai käynnistämällä erilaisia palontorjuntajärjestelmiä.

FdsEvacissa kukin poistuva henkilö löytää poistumisoven seuraamalla kaksiulotteisen puristumattoman potentiaalivirtauksen ratkaisua, jonka reunaehdot riippuvat kunkin henkilön käytettävissä olevista poistumisreiteistä. FDS-ohjelman virtausratkaisijalla lasketaan likimääräinen ratkaisu tälle potentiaalivirtaukselle käyttämällä virtaavalle nesteelle niin suurta viskositeetin arvoa ja matalia virtausnopeuksia, että ratkaisussa ei esiinny pyörteitä. Tämän vaatimat reunaehdot voidaan antaa kahdella toisistaan eroavalla tavalla: 1) kaikki seinät työntävät nestettä poistumistilaan vakiomäärällä (ja nopeudella), jolloin neste virtaa ulos avonaisista ovista, 2) kaikki seinät ovat reagoimattomia ja ovet toimivat pumppuina, jotka imevät nestettä pois laskenta-alueesta (luoden samalla alipaineen laskenta-alueeseen). Kummatkin kikat tuottavat siistin suuntakentän poistumiselle kuten kuvassa 1 olevasta esimerkistä havaitaan. Menetelmiä pitää kuitenkin jatkossa verrata kokeellisiin havaintoihin,

jotta nähtäisiin se, että tuottavatko ne oikeanlaisia tuloksia suurten ihmismäärien poistumiselle.



Kuva 1. Yksinkertainen esimerkki FDS:n laskemasta virtauskentästä, joka ohjaa poistuvien henkilöiden liikettä. Nyt vain yksi kahdesta ovesta on käytössä poistumiseen.

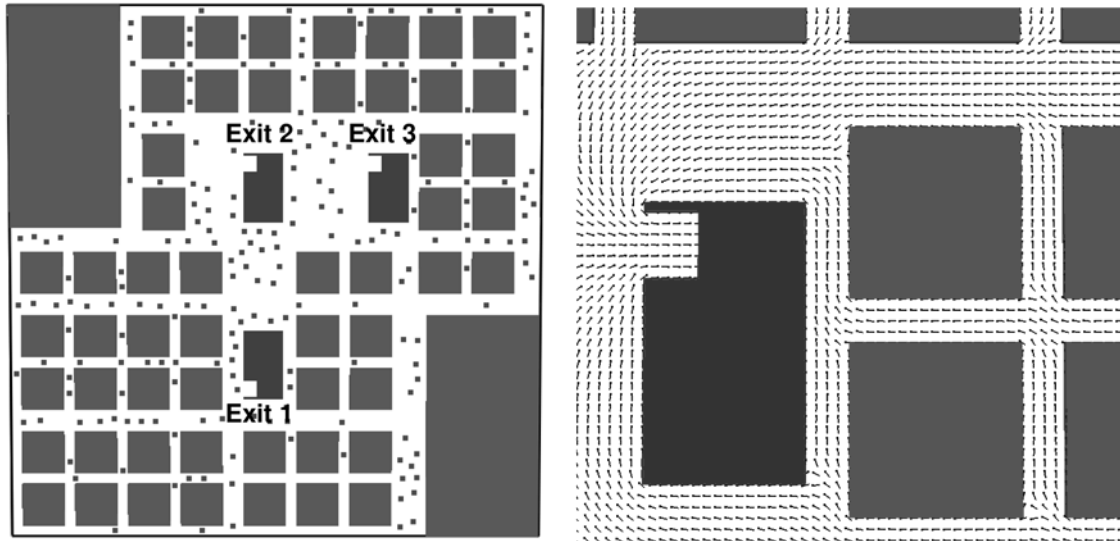
TULOKSET JA POHDINNAT

FdsEvacia testattiin kolmessa tilanteessa: (A) avokonttori, (B) laaja avonainen tila (urheiluhalli) ja (C) kokoontumistila. Nämä kolme tilannetta valittiin, koska ounasteltiin FdsEvacin niissä eroavan muista olemassa olevista poistumisohjelmista. Niiden oletettiin myös paljastavan mahdollisia virheitä FdsEvacin istuttamisessa osaksi FDS-palonsimulointiohjelmaa.

Tapaus A: Avokonttori

A koostuu monikerroksisen toimistotalon yhdestä kerroksesta, jonka pohjapiirros on esitetty kuvassa 2. Kerros on $40 \times 40 \text{ m}^2$ suuruinen ja tässä kerroksessa on alkujaan 216 henkilöä. Näiden henkilöiden ominaisuudet valittiin vastaamaan Simulex-ohjelman [14, 15] toimistohenkilöstön ryhmää. Henkilöiden reagointiajan oletettiin olevan normaalijakautunut: keskiarvo 90 s ja keskihajonta 11 s.

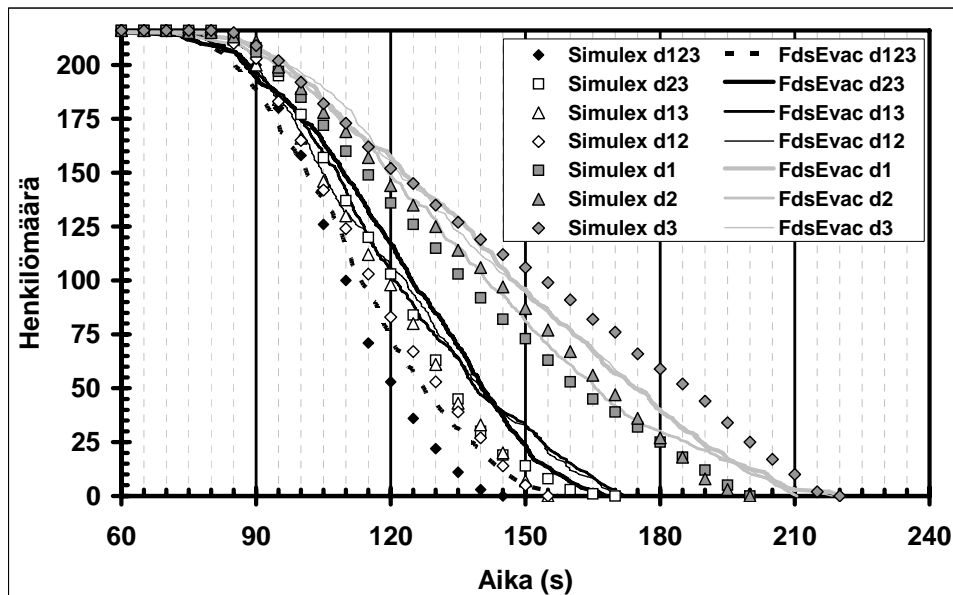
FdsEvac- ja Simulex-ohjelmalla lasketut tulokset ovat esitetty kuvassa 3. Laskut suoritettiin erilaisille poistumisovien yhdistelmille, koska osa ovista voi olla poissa käytöstä syystä tai toisesta. Poistumisen aikana esiintyi ruuhkaa ovilla ainoastaan silloin, kun kaksi kaikkiaan kolmesta ovesta oli tukossa. Siksi tapauksissa, joissa oli kaksi tai kolme poistumistietä käytössä, poistumiskäyrien muoto määräytyy suoraan käytetystä reagointiajan jakaumasta. Tuloksista huomataan, että FdsEvac- ja Simulex-ohjelmat antavat varsin yhteneväiset tulokset.



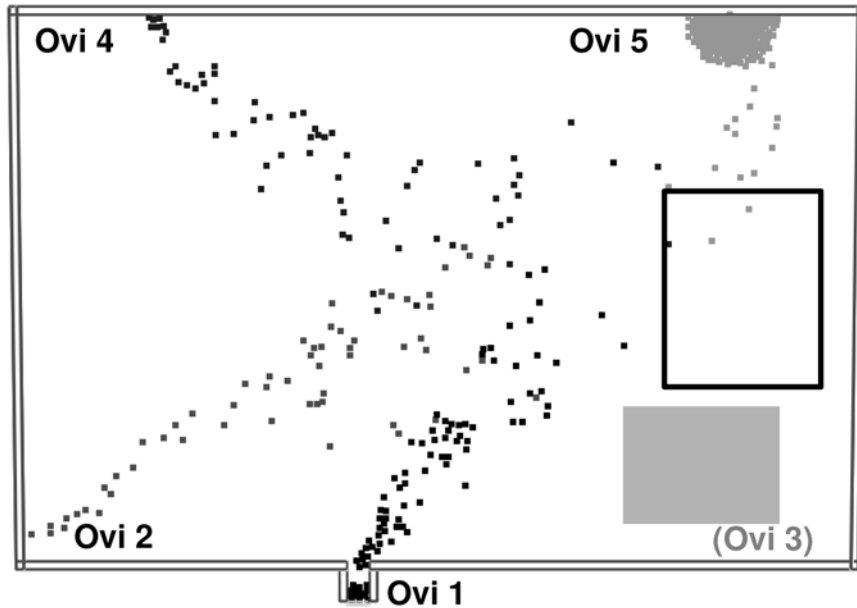
Kuva 2. Vasemmalla tilanteen A pohjapiirros sekä poistuvien ihmisten satunnaiset alkupaikat. Oikealla on yksityiskohta käytetystä ihmisiä ohjaavasta virtauskentästä.

Tapaus B: Urheiluhalli

B on urheiluhalli [16], jota käytetään yleisurheilun ja jalkapallon harjoitteluun. Hallissa ei ole katsomoita eikä siellä ole myöskään mitään sosiaalitiloja, kuten suihkuja ja pukuhuoneita. Hallin käyttäjät kulkevat pääsisäänkäynnin ('Ovi 1' kuvassa 4) 1,8 m leveistä pariovista. 4,0 m leveitä pariovia 2 ja 3 voidaan poistumisen lisäksi käyttää tavaran kuljettamiseen. Ovet 4 ja 5 ovat 0,9 m leveitä poistumisovia.



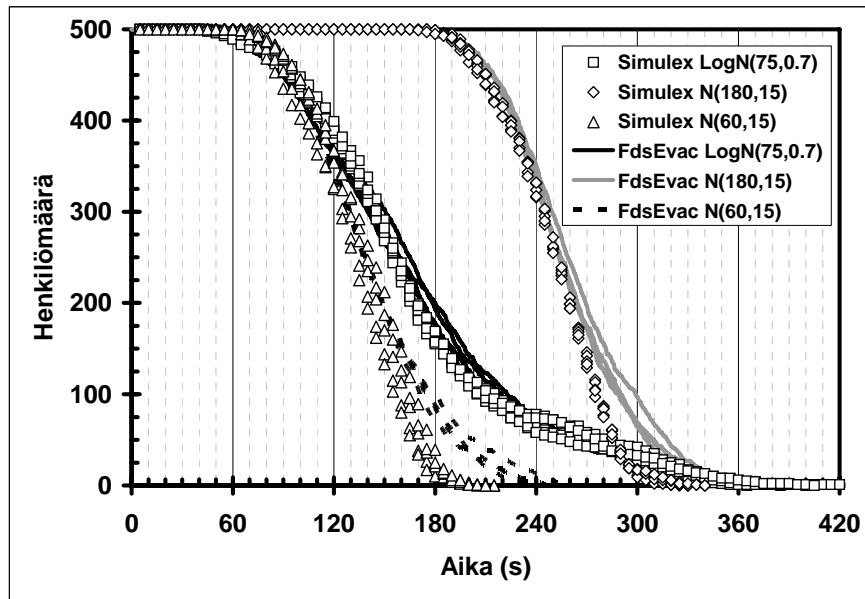
Kuva 3. FdsEvac- ja Simulex-ohjelmilla laskettujen poistumisaikojen jakauma tilanteessa A. Merkinnät viittaavat käytettyihin avoimien ovien yhdistelmiin..



Kuva 4. Hetkellinen kuva poistumisesta FdsEvac-simuloinnilla tilanteessa B.

Tilanteessa B oletetaan, että tulipalo (harmaalla merkitty alue kuvassa 4) syttyy lähellä ovea 3, joten sitä ei voida käyttää poistumiseen. Henkilöiden oletetaan aluksi olevan hallin itäpäässä $20 \times 25 \text{ m}^2$ kokoisella alueella (avonainen suorakaide kuvassa 4). Lisäksi oletetaan, että 235 henkilöä käyttää lähintä ovea (ovi 5), 130 henkilöä käyttää pääsisäänkäyntiä (ovi 1), 60 henkilöä käyttää ovea 2 ja 75 henkilöä käyttää ovea 4. Laskennat tehtiin käyttämällä kolmea erilaista reagointiaikajakaumaa. Kaksi näistä oli normaalijakaumia 15 s keskihajonnalla, mutta eri keskiarvoilla (60 s ja 180 s), ja kolmas oli logaritminen normaalijakauma (mediaani 75 s, reagointiajan logaritmin keskihajonta 0,7). Itse asiassa logaritmista normaalijakaumaa jouduttiin aproksimoimaan kahdella tasajakaumalla, sillä käytössä olevassa versiossa Simulex-ohjelmasta ei ollut tukea logaritmisesti normaaleille reagointiajoille.

Poistumisaikalaskelmien tulokset ovat esitetty kuvassa 5. Niistä nähdään, että FdsEvacilla lasketut tulokset ovat hyvin sopusoinnussa Simulexilla laskettujen tulosten kanssa. Kun reagointiajan jakaumat ovat kapeita (keskihajonta 15 s), menetelmien välillä on huomattavissa eroja. Nämä erot aiheutuvat oven 5 ruuhkautumisesta, sillä se on vain 0,9 m leveä ja sen kautta poistuu 235 henkilöä.

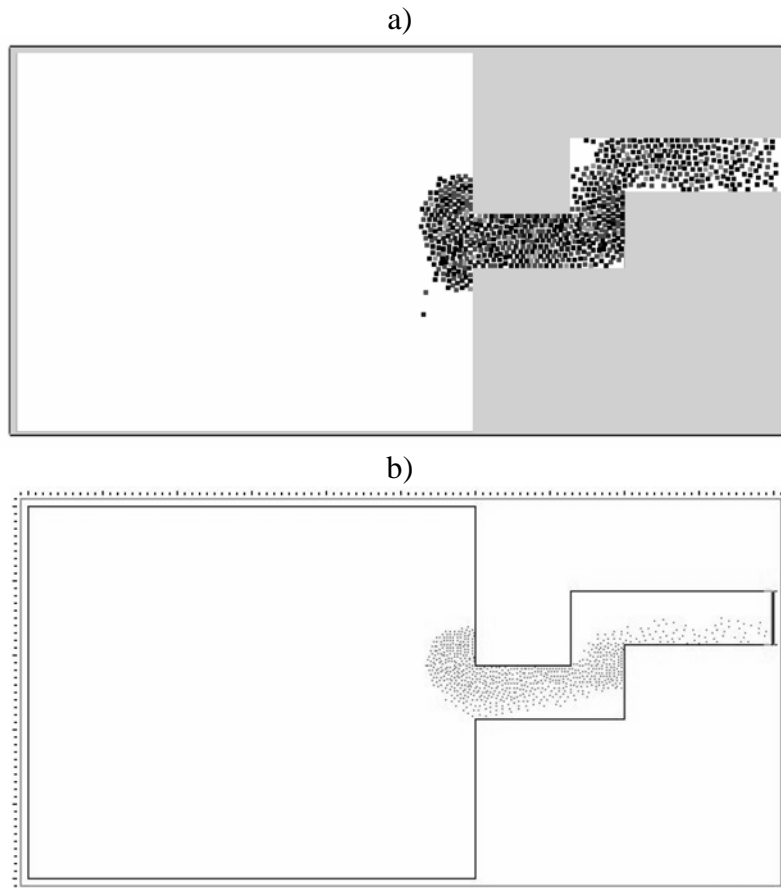


Kuva 5. Tilanteen B simulointi FdsEvac- ja Simulex-ohjelmilla.

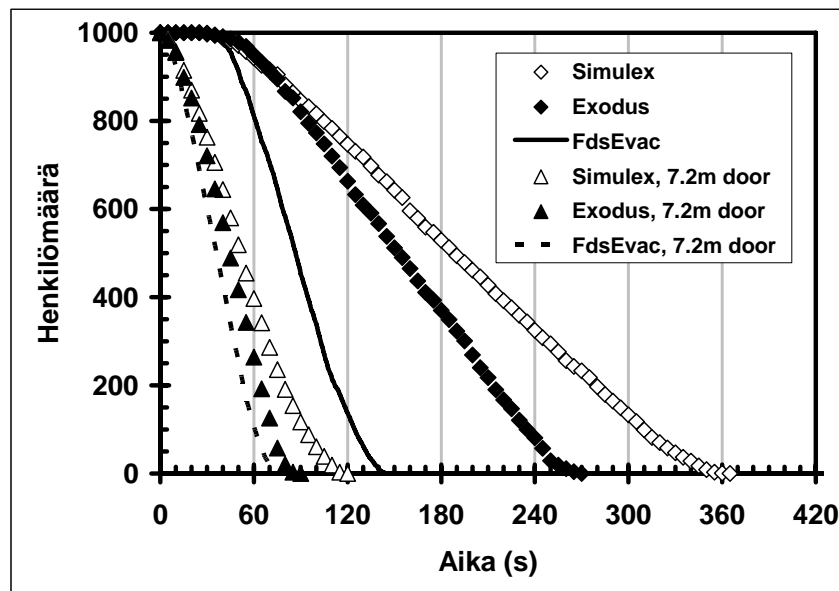
Tapaus C: Kuvitteellinen kokoontumistila

C on suurehko $50 \times 60 \text{ m}^2$ kuvitteellinen kokoontumistila. Tilasta johtaa ulos vain yksi 7,2 m leveä käytävä. Kuvasta 6 on kohteen muoto ja laskennan aikaiset tuokiokuvat poistumisesta sekä FdsEvac- (6a) että Simulex-ohjelmalla (6b). Alkujaan tilassa on 1000 henkilöä satunnaisesti jakautuneena koko tilaan. FdsEvac kulutti laskentaan noin 700 CPUs 2,2 GHz P4-prosessorilla ja 2 GB keskusmuistilla varustetussa PC:ssa. Simulex kulutti noin 5400 CPUs 800 MHz PIII-prosessorilla ja 384 MB keskusmuistilla varustetussa PC:ssa.

Laskelmien tulokset on esitetty kuvassa 7, jossa FdsEvacilla tehtyjä laskuja verrataan Simulex- ja buildingExodus-ohjelmilla tehtyihin laskuihin. Eri menetelmien välillä on merkittäviä eroja. Nämä eroavaisuudet johtuvat ihmisten liikkumisesta mutkallisessa käytävässä (kts. kuva 6). Simulex ja buildingExodus eivät käytä käytävän koko leveyttä tehokkaasti hyväkseen, kun simulaatiot tehdään käyttämällä normaaleja syöteparametreja ja oletusarvoja. (Näihin menetelmiin perehtynyt käyttäjä voisi saada erilaisia tuloksia käyttämällä joitakin ohjelmien lisäominaisuuksia.) FdsEvacin tulokset näyttävät realistisemmilta kuin käytettyjen kahden vertailuohjelmiston tulokset. Kuvassa 7 on myöskin esitettyä tulokset tilanteelle, jossa ei ole ollenkaan käytävää vaan se on korvattu suoraan ulosavautuvalla 7,2 m leveällä uloskäynnillä. Tässä tapauksessa kaikkien kolmen menetelmän antamat tulokset ovat huomattavasti lähempänä toisiaan.



Kuva 6. Tuokiokuvia tilanteen B laskennan ajalta (a)FdsEvac- sekä (b) Simulex-ohjelmalla.



Kuva 7. VertailuFdsEvac-, buildingExodus- ja Simulex-ohjelmilla lasketuista poistumisajoista tilanteessa C.

JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä esitellyn FdsEvacin havaittiin toimivan tyydyttävästi ja tarpeeksi nopeasti käytännön sovelluksia ajatellen. Vertailtaessa FdsEvacin antamia tuloksia Simulex- ja buildingExodus-ohjelmistojen kanssa tilanteissa A ja B yhteensopivuus oli hyvä. Ruuhkaisen käytävän, tilanne C, laskennassa ilmeni huomattavia eroavaisuuksia menetelmien välillä. Koska esimerkkitalanteille ei ole käytössä kokeellista aineistoa, vertailua voitiin suorittaa vain eri mallien teknisestä toimivuudesta. Mallien antamien tulosten erot ovat niin suuria, että se motivoi tutkimuksen ja kokeellisten mittausten jatkamista aiheesta.

FdsEvacin kehittäminen jatkuu edelleen ja seuraava vaihe on lisätä tulipalon vaikutuksia poistuviin ihmisiin, mikä mahdollistaa henkilöiden toimintakyvyn heikentämisen ja vammautumisen mallintamisen. Tämän jälkeen on vuorossa poistumisen käynnistävien tekijöiden sekä poistumista ohjaavien tekijöiden lisääminen laskentaan (yksilöllinen ja laumakäyttäytyminen, poistumisopasteiden näkyvyys, henkilösuhteiden sekä omien tavaroiden etsimisen vaikutukset). Koska näille tekijöille ei ole käytettävissä selkeitä malleja, näille tehdään aluksi yksinkertaisia numeerisia kokeita kytkemällä malli päälle/pois, numeerisia testejä sekä herkkyystarkasteluja lyhyehköillä Monte Carlo -analyysillä ohjaamaan mallinnukselle merkittävien muuttujien valintaa sekä myöskin ohjaamaan mahdollisten poistumiskokeiden suunnittelua.

KIITOKSET

Kiitämme Erica Kuligowskia (NIST) sekä Henry Weckmania (VTT) heidän tekemistään vertailulaskuista käyttäen toisia poistumisaikaohjelmia sekä Kevin McGrattania (NIST) poistumisaikalaskelmien vaatimien aliohjelmien liittämisestä osaksi FDS:n ohjelmakoodia. T.K. haluaa kiittää NIST:n Building and Fire Research laboratoriota ja sen henkilökuntaa vieraanvaraisuudesta sinne tekemänsä kolmen kuukauden matkan aikana.

LÄHDELUETTELO

1. Smith, R.A. Density, velocity and flow relationships for closely packed crowds. *Safety Science* 18, s. 321-327 (1985).
2. Thompson, P.A. & Marchant, E.W. Computer and fluid modeling of evacuation. *Safety Science* 18, s. 277-289 (1995).
3. Sime. J.D. Crowd psychology and engineering. *Safety Science* 21, s. 1-14 (1995).
4. Schreckenberg, M. & Sharma, S.D. (eds.) *Pedestrian and Evacuation Dynamics*. Springer, Berlin, 2002. 452 s.
5. Galea, E.R. (ed.) *Pedestrian and Evacuation Dynamics - Proceedings of the Second International Conference*. University of Greenwich, London, 2003. 411 s.
6. Helbing, D. Fundamentals of traffic flow. *Physical Review E* 55, s. 3735-3738 (1997).

7. Helbing, D. Traffic and Related Self-Driven Many-Particle Systems. *Reviews of Modern Physics* 73, s. 1067-1141 (2001).
8. Helbing, D., Hennecke, A., Shvetsov, V. & Treiber, M. Micro- and macrosimulation of freeway traffic. *Mathematical and Computer Modeling* 35, s. 517-547 (2002).
9. Helbing, D., Farkas, I. & Vicsek, T. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature* 407, s. 487-490 (2000).
10. Helbing, D., Farkas, I., Molnár, P. & Vicsek, T. Simulating of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situations. *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Schreckenberg, M. & Sharma, S.D. (eds.), Springer, Berlin, 2002. S. 21-58.
11. Helbing, D. & Molnár, P. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E* 51, s. 4282-4286 (1995).
12. Werner, T. & Helbing, D. The social force pedestrian model applied to real life scenarios. *Pedestrian and Evacuation Dynamics - Proceedings of the Second International Conference*, University of Greenwich, London, 2003. S. 17-26.
13. McGrattan, K.B., Baum, H.R., Rehm, R.G., Hamins, A., Forney, G.P, Floyd, J.E, Hostikka, S. & Prasad, K. *Fire Dynamics Simulator (Version 3) - Technical Reference Guide*. National Institute of Standards and Technology Report NISTIR 6783, Gaithersburg, MD, 2002. 46 s.
14. *Simulex: Evacuation Modelling Software, User's Guide*. Integrated Environmental Solutions Ltd., Glasgow, Scotland, UK, 1996. 48 s.
15. Thompson, P.A. & Marchant, E.W. A Computer Model for the Evacuation of Large Building Populations. *Fire Safety Journal* 24, s. 131-148 (1995).
16. Paloposki, T., Myllymäki, J. & Weckman, H. Application of reliability techniques for calculation of the evacuation safety of a sports hall. *VTT Building and Transport, VTT Research Notes* 218, Espoo, Finland, 2002. 53 s. + liitt. 13 s.