

TULIPALOJEN HENKILÖRISKIN SIEDETTÄVÄN TASON ARVIOINTI

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

Tiivistelmä

Toiminnallisen palomitoituksen hyväksymiskriteerit tulisi asettaa valtakunnallisina ohjeina tai säädöksinä. Tässä artikkelissa esitetään näiden ohjeiden/säädösten perustaksi tulipalojen henkilöriskien siedettävän tason arviointiin soveltuva palotilastoihin perustuva F-N -käyräesitys.

JOHDANTO

Rakennusmääräyskokoelman osan E1 kohdan 1.3.2 mukaan toiminnallisessa palomitoituksessa suunnitelman hyväksymiskriteerit tulee esittää rakennusluvan käsittelyyn laadituissa kohdekohtaisissa asiakirjoissa. Tämä merkitsee siedettävissä olevan riskitason määrittämistä kullekin kohteelle erikseen, mikä käytännössä tulkintaeroavuuksien vuoksi voi johtaa hyvinkin erilaisiin turvallisuustasoihin. Ihmishenkien ja omaisuuden arvo on kuitenkin sama kaikkialla maassamme ja siksi toiminnallisen palomitoituksen hyväksymiskriteerit tulisi lähtökohtaisesti asettaa valtakunnallisella tasolla ylimpien rakentamista ja pelastustoimea säätelevien viranomaisten toimesta. Lisäksi hyväksymiskriteerit tulisi ilmaista määrällisesti eli asettamalla paloriskeille korkein taso, jota ei saa ylittää. Tämä taso on yhteiskunnan sietämä korkein riski, jonka tulipalo-onnettomuuksissa voidaan sallia.

Tässä esityksessä luodaan katsaus tulipalojen henkilöriskien siedettävän tason arviointiin käyttäen hyväksi tulipalotilastoista saatavia tietoja sekä todennäköisyyspohjaista palonsimulointia. Ehdotettava siedettävän riskin esittämisen riskianalyttinen menetelmä on ns. F-N -käyrä, jonka yleiset perusteet ja soveltaminen tulipalojen henkilöriskeihin esitellään.

PALORISKEISTÄ

Yleinen riskien jaottelutapa on jako yksilökohtaisiin (individual) ja yhteiskunnallisiin (societal) riskeihin. Yksilökohtainen riski mittaa yhteen henkilöön kohdistuvaa riskiä ja yhteiskunnallinen riski mittaa ihmisjoukkoihin kohdistuvaa riskiä. Kemian prosesseihin liittyviä riskejä käsittelevä ohje CPQRA [1] havainnollistaa yksilökohtaisen ja yhteiskunnallisen riskin eroa seuraavasti: Tarkastellaan toimistotaloa, joka sijaitsee lähellä tehdasta. Talossa on päiväsaikaan 400 henkeä ja muina aikoina yksi henkilö. Jos onnettomuuden vaara on sama kellonajasta riippumatta, kunkin henkilön yksilökohtainen riski on tietty vakio riippumatta henkilömäärästä. Yhteiskunnallinen riski sen sijaan on selvästi suurempi päivisin, jolloin vaaralle voi altistua 400 henkeä, kuin muina aikoina, jolloin vaaralle altistuu vain yksi henkilö.

Taulukko 1. Esimerkkejä yksilökohtaisen riskin suuruudesta (sveitsiläisen tutkimuksen tuloksia [2]).

Toiminto/onnettomuustyyppi	Vuotuinen kuoleman todennäköisyys miljoonaa henkeä kohden
tupakointi, 20 savuketta päivässä	4000
alkoholin käyttö, pullo viiniä päivässä	3000
moottoriurheilu (moottoripyöräily)	1500
jalankulkijat, kotityö	100
autolla matkustaminen, 10 000 km vuodessa	100
autolla matkustaminen moottoritiellä, 10 000 km vuodessa	30
lentokoneen putoamisen todennäköisyys yhtä lentoa kohden	10
palokuolema	10: Sveitsi; 20: Suomi
junalla matkustaminen 10,000 km vuodessa	10
salamanisku	1

Taulukossa 1 esitetään joihinkin toimintoihin tai onnettomuustyyppihin liittyvien yksilökohtaisten riskien suuruuksia [2]. Eri riskien suuruuden vaihtelevuuden lisäksi taulukosta voidaan nähdä, että yksilöiden riskinottoon vaikuttavat sellaiset tekijät kuin riskin ottamisen vapaaehtoisuus ja riskin ilmeneminen (heti/viiveellä ja satunnaisesti/toistuvasti). Muita riskien subjektiiviseen arviointiin vaikuttavia tekijöitä ovat vaaran vakavuus samoin kuin sen tuttuus (uusi/vanha), kontrolloitavuus, siihen liittyvät edut ja tarpeellisuus sekä alkuperä (ihmisen aiheuttama/luonnon aiheuttama) [3].

Vaaran vakavuus on tärkein riskin arviointiin liittyvä tekijä: mitä suurempi vaara on, sitä pienemmäksi sen toteutumisen todennäköisyys halutaan. Matemaattisesti tämä voidaan ilmaista siten, että riski R ilmaistaan vaaran esiintymistäajuuden F ja sen aiheuttamien uhrien lukumäärän N painotettuna tulona

$$R = F \cdot N^p, \quad (1)$$

missä indeksi $p \geq 1$ kuvaa moniuhristen onnettomuuksien painottumista. Yhteiskunnallisessa paloriskien arvioinnissa uhrien määrä on olennainen tekijä: moniuhriset palot ovat selvästi vähemmän siedettyjä kuin palot, joissa uhrien lukumäärä rajoittuu yhteen. Yhteiskunnallisen paloriskin määrällisen esittämisen soveltuvin työkalu on F-N -käyrä [4].

F-N -KÄYRÄ

Yleistä

F-N -käyrä esittää onnettomuuksien esiintymistäajuuden riippuvuuden uhrien lukumäärästä. Uhrit ovat yleensä kuolonuhreja. Koska moniuhristen onnettomuuksien taajuus on usein monta kertaluokkaa pienempi kuin keskimäärin yhden tai vähemmän uhreja vaativien onnettomuuksien, F-N käyrä esitetään yleensä logaritmisella asteikolla. Luettaessa F-N -käyräesityksiä on tärkeää ottaa huomioon, miten taajuus on ilmaistu: varsin usein taajuus esitetään vuosittaisena esiintymistäajuutena, mutta se voidaan esittää myös yhtä onnettomuutta kohden laskettuna arvona.

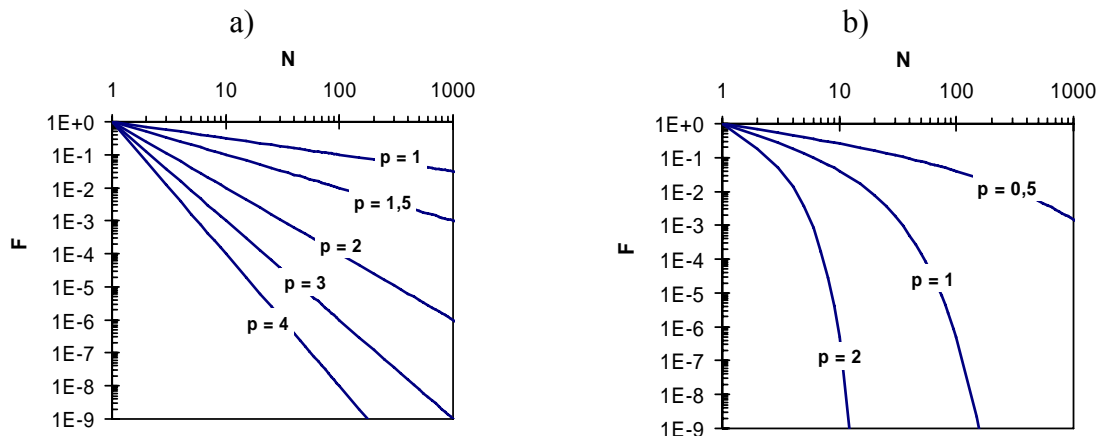
Kun lauseke (1) ratkaistaan taajuuden F suhteen saadaan tulos

$$F(N) = R \cdot N^{-p}, \quad (2)$$

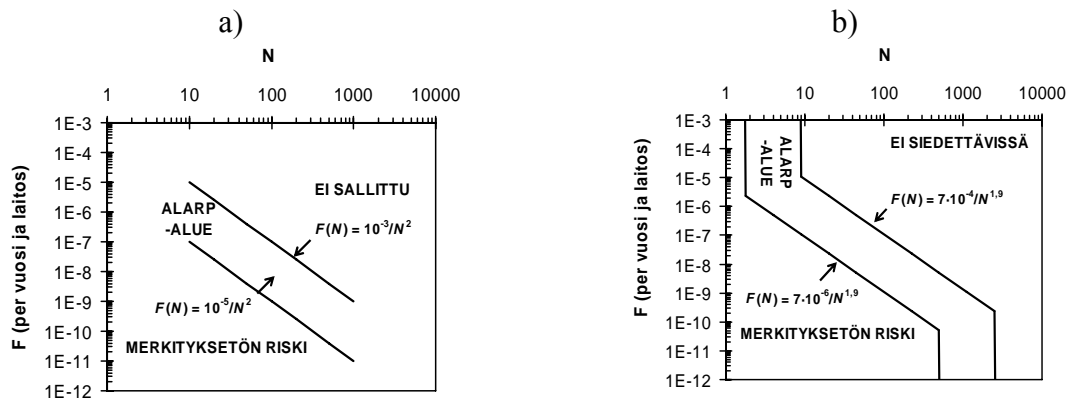
missä merkintä $F(N)$ painottaa, että F riippuu N :stä. Kuva 1a esittää tätä lauseketta käyttäen laskettuja F-N -käyriä indeksin p eri arvoilla, kun riskillä on jokin tietty vakioarvo (tässä $R = 1$). On myös mahdollista, että riskin suuruuden halutaan pienenevän seuraamusten kasvaessa esim. eksponentiaalisesti, $R = R_0 \cdot \exp(-\alpha N)$, missä R_0 ja α ovat parametreja. Taajuus $F(N)$ on tällöin

$$F(N) = R_0 \cdot e^{-\alpha N} \cdot N^{-p}. \quad (3)$$

Kuva 1b esittää tässä tapauksessa saatavia F-N -käyriä.



Kuva 1. a) Vakioista riskiä vastaavia F-N -käyriä (tässä $R = 1$) ja b) eksponentiaalisesti seuraamusten suuruuden mukana pienevää riskiä vastaavia F-N -käyriä (tässä $\alpha = 1$ ja $R_0 = e^1$).



Kuva 2. a) Hollannissa kemian prosessiteollisuudelle asetetut riskin rajakäyrät [5] ja b) Sveitsissä ympäristöönnettomuuksia koskevissa ohjeissa asetettu F-N -käyrä [6] sekä ALARP-periaatteen havainnollistus.

F-N -käyriä käytetään siedettävissä olevien riskien mittana. Yksi tunnetuimpia F-N -esityksiä on Hollannissa kemian prosessiteollisuuden suuronnettomuuksille asetettu suurin sallittu laitoskohtainen uhrien vuotuinen lukumäärä [5]:

$$F_{VROM, \max}(N) = 10^{-3} \cdot N^{-2}, N \geq 10. \quad (4)$$

Tämä F-N -käyrä vastaa suurinta sallittua uhrien lukumäärää. Sen lisäksi Hollannissa on määritelty alaraja, joita pienempiä riskejä voidaan pitää merkityksettömän pieninä (*de minimis* -alue).

$$F_{VROM,min}(N) = 10^{-5} \cdot N^{-2}, N \geq 10. \quad (5)$$

Tämän rajan saavuttamista voidaan pitää riskien hallinnan korkeimpana tavoitteena. Käytännössä siihen ei eri syistä kuitenkaan päästä, vaan joudutaan tyytymään siihen, että riskien taso on niin alhainen kuin se kohtuudella on mahdollista (*As Low As Reasonably Practicable*) eli riskit ovat ns. ALARP -alueella (kuva 2a). Sveitsissä ympäristö- onnettomuuksia koskeissa ohjeissa on asetettu kuvassa 2b esitetyt F-N -käyrärajat ei-sallituille ja hyväksyttävissä oleville riskeille [6]. Niiden lineaaristen osien lausekkeet ovat

$$F_{VROM,max}(N) = 7 \cdot 10^{-4} \cdot N^{-1,9}, 2500 \geq N \geq 10 \text{ ja} \quad (6)$$

$$F_{VROM,min}(N) = 7 \cdot 10^{-6} \cdot N^{-1,9}, 500 \geq N \geq 2. \quad (7)$$

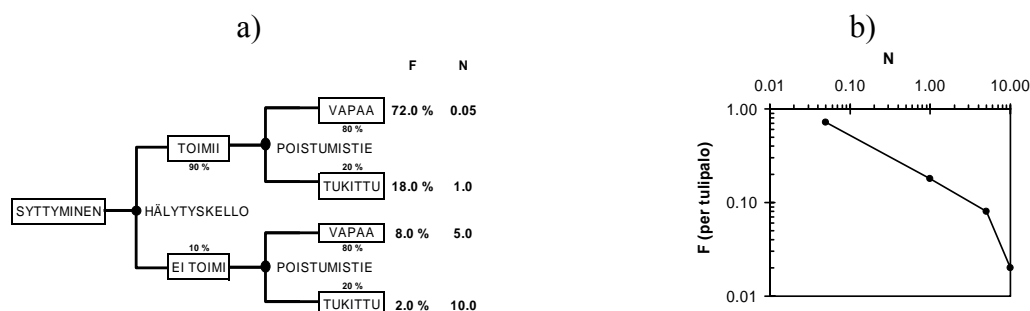
Sveitsin kriteeriot ovat lineaarisilta osilta olennaisesti samat kuin Hollannin F-N -käyrät. Iso-Britanniassa Health and Safety Executive (HSE) on asettanut kriteerejä teollisuuden onnettomuuksille. Eräs uusimmista HSE:n asettamista kriteereistä on esitetty viitteessä [7, kohta 136]. Sen mukaan yli 50 uhria aiheuttavien onnettomuuksien ei tulisi ylittää vuotuista taajuutta $2 \cdot 10^{-4}$. Tämä kriteerio koskee työntekijöitä ja siksi se etunäkökohdan nojalla on suurempi kuin yllämainitut "ulkopuolisia" koskevat riskirajat.

F-N käyrän soveltaminen paloriskeihin

Paloturvallisuutta koskevia F-N -käyriä on esitetty jo parikymmentä vuotta sitten (esim viite [8] ja Taulukko 2).

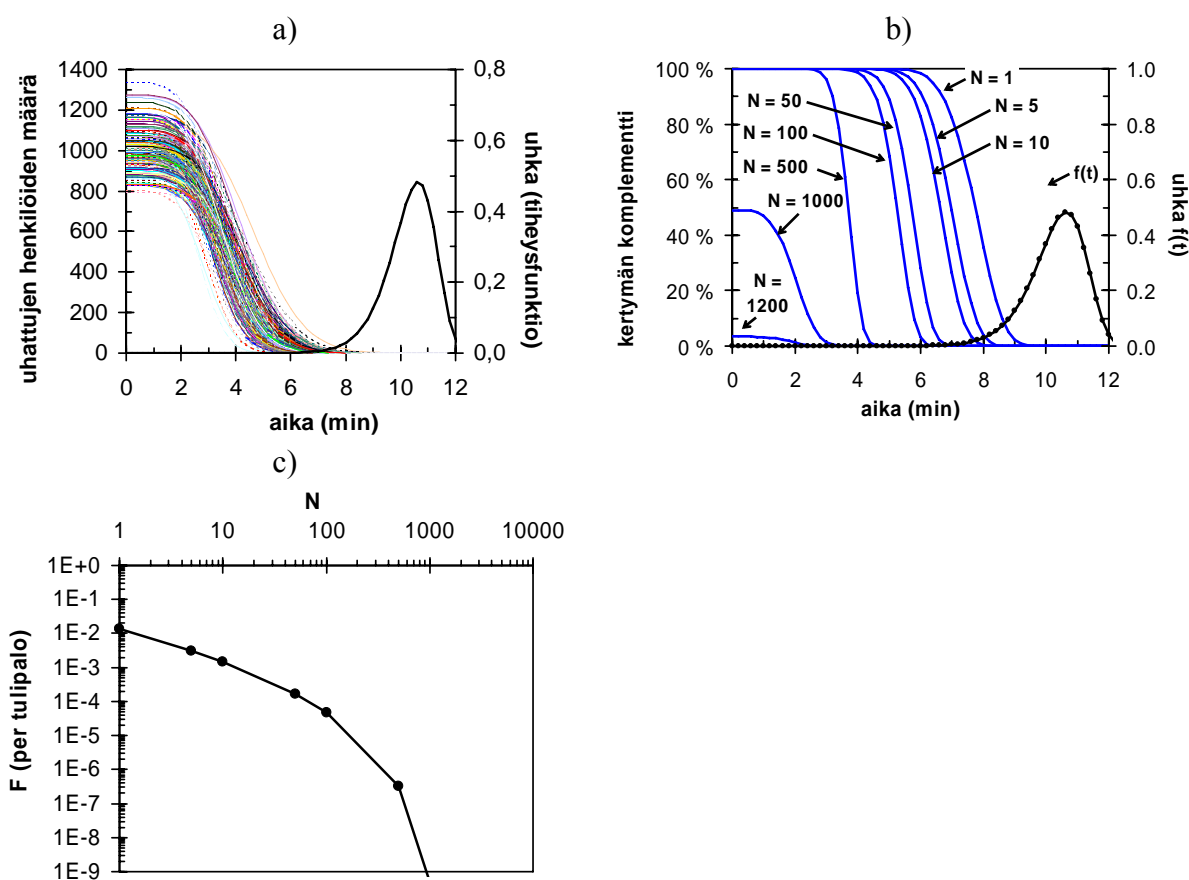
Taulukko 2. Rasbashin vuotuisille palokuolemille esittämiä F-N -kriteerejä[8, 9].

Uhattuna olevien lukumäärä	N – uhrien lukumäärä			
	>5	>15	>100	>500
< 15	5×10^{-7}	---	---	---
15 - 100	1×10^{-6}	3×10^{-7}	---	---
100 - 500	2×10^{-6}	5×10^{-7}	6×10^{-8}	---
> 500	4×10^{-6}	8×10^{-7}	1×10^{-7}	5×10^{-8}



Kuva 3. Esimerkki F-N -käyrän laskennasta tapahtumapuun avulla: a) yksinkertainen esimerkki poistumisturvallisuuden arviointiin käytetystä tapahtumapuusta [10] ja b) tapahtumapuun perusteella laskettu F-N -käyrä.

Lähinnä Lundin yliopistossa tehtyjä tutkimuksia lukuunottamatta (esim. viite [10] ja kuva 3) F-N -käyriä ei kuitenkaan ole juurikaan sovellettu rakennusten paloturvallisuussuunnittelussa, vaikka palon simulointia käytetäänkin laajalti suurien kohteiden, kuten kauppakeskusten ja teollisuuden kohteiden suunnittelussa. Pääasiallinen syy tähän on ollut laskennan kalleus, mutta tämä asia on muuttumassa nopeasti. Suurien kohteiden paloturvallisuussuunnittelussa virtauslaskentaan perustuvat kenttämallit ovat jo korvanneet vyöhykemallit ja kun tähän samaan laskentaympäristöön lisätään poistumisen laskenta, saadaan realistinen kuva ihmisten poistumismahdollisuuksista tulipalo-olosuhteissa, jossa fyysiset ja psyykkiset stressitekijät vaikeuttavat toimintaa. Seuraava askel on tällaisen laskennan toteuttaminen stokastisesti käyttäen Monte Carlo -laskentatekniikkaa [ks. esim. 11], mikä sekin on jo teknisesti mahdollista [4]. Kuva 4 esittää, miten F-N -käyrä voidaan laskea Monte Carlo -laskentatekniikkaa käyttäen.



Kuva 4. Esimerkki F-N -käyrän laskennasta käyttäen stokastista mallintamista ja Monte Carlo -laskentatekniikkaa: a) Stokastisen poistumisen mallintamisen tuloksena saatuja rakennuksessa sisällä olevien henkilöiden määrää kuvaavia käyriä ja todennäköisyysperustaisen palonsimuloinnin tuloksena saatu heitä uhkaavien tekijöiden kehittymistä kuvaava todennäköisyys (tiheysfunktio), b) eri henkilömääriä vastaavat todennäköisyysjakaumat (todennäköisyys, että uhattuna on vähintään N henkilöä) ja c) näiden tietojen perusteella laskettu F-N -käyrä.

PALOTILASTOIHIN PERUSTUVA HENKILÖRISKIEN F-N -KÄYRÄ

Kuvassa 5 esitetään F-N -käyrä, joka perustuu useiden maiden moniuhrisia tulipaloja koskeviin palotilastoihin [12]. Huomaa, että taajuudet on laskettu yhtä rakennuspaloa kohden. Tiedot kerättiin ensin kolmesta Pohjoismaasta, Suomi, Norja ja Tanska, ja koska saadut tilastolliset populaatiot olivat pienehköjä, niihin lisättiin Yhdysvaltojen palotilastotietoja, joiden avulla aineistoon saatiin tietoa moniuhrisista paloista aina 12 uhriin saakka. Tämän rajan yläpuolella ei ole käytettävissä suoranaista systemaattisesti kerättyä tietoa, mutta siitä on kuitenkin olemassa Yhdysvaltoja koskevia arvioita, joita hyödynnettiin [13]. Tilastotietoihin sovitettiin kaksi vaimennettua Pareto-jakaumaa: uhrien lukumäärävälille $1 \leq N \leq 12$ käytettiin lauseketta

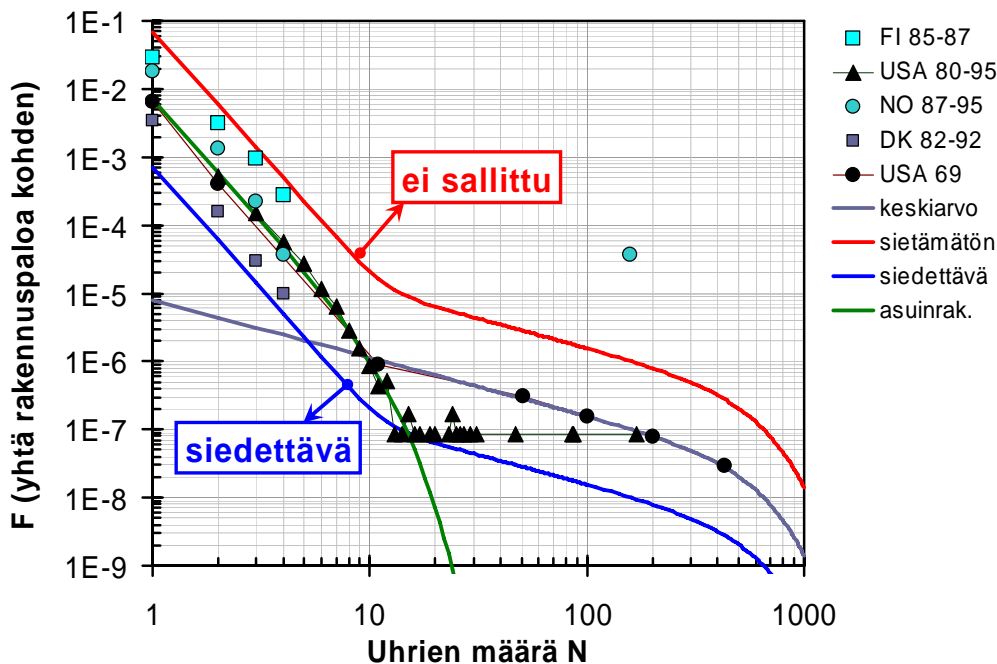
$$F(N) = A \exp\left(-\left(N/N_1\right)^2\right) / \left(N/N_1\right)^{n_1}, \quad 1 \leq N \leq 12 \quad (8)$$

ja yli 12 uhrisille tulipaloille käytettiin lauseketta

$$F(N) = A \exp\left(-\left(N/N_2\right)^2\right) / \left(N/N_2\right)^{n_2}, \quad 12 < N, \quad (9)$$

missä parametrien N_i ja n_i arvot ovat: $N_1 = 11$ ja $n_1 = 3,5$ sekä $N_2 = 600$ ja $n_2 = 0,85$. Uhrien lukumäärien "cut-off" -arvot N_1 ja N_2 liittyvät uhalle altistuvien henkilöiden lukumäärään. Tapahtumille, jotka vastaavat "asuinrakennuksia" ja "keskiarvoa", niiden arvot ovat erisuuret ja jälkimmäisen arvo voi kasvaa vielä edelleen, kun yksikkökoot kasvavat.

Sietämättömien ja siedettävien riskien rajakäyrät saadaan siten, että edellä mainitut sovitejakaumat lasketaan yhteen ja kertomalla tai jakamalla saatu käyrä tekijällä 10 (sietämättömien riskien rajakäyrä saadaan tuloksena kertomisesta ja siedettävien riskien rajakäyrä jakamisesta). Kuvan 5 mukaan havaintojen ääriarvotkin ovat näiden rajakäyrien rajoittaman alueen sisällä.



Kuva 5. Palotilastoihin perustuva ehdotus tulipalojen henkilöriskien siedettävän tasoain arvioimiseen käytettävästä F-N -käyrästä.

Rajakäyriä käytetään paloturvallisuussuunnittelussa seuraavasti: kun ihmisten poistumisen Monte Carlo -laskennan tuloksena saadaan F-N -käyrä kuvassa 4 esitetyllä tavalla, jotta suunnitelma voitaisiin hyväksyä, kaikkien lasketun käyrän pisteiden tulee olla sietämättömän riskitason alapuolella. Jos kaikki pisteet ovat jopa alemman, siedettävää riskitasoa kuvaavan alapuolella, suunnitelma voidaan hyväksyä sellaisenaan ilman jatkotoimenpiteitä. Jos osa tai kaikki lasketuista pisteistä osuu rajakäyrien väliin (ALAPR-alue), niin tällöin tulee harkita, voidaanko suunnitelmaa parantaa kohtuullisin ponnisteluin ja jos voidaan, niin tällöin nämä toimenpiteet tulee tehdä.

Huomattakoon, että kuvassa 5 esitetyn F-N -käyräehdotuksen perustana olevat tilastotiedot eivät ole aivan viimeisimpiä ja siksi niiden päivittämiseksi olisi hyvä tehdä uusi kansainvälinen palotilastaselvitys. Tuolloin ei myöskään olisi pahitteeksi, jos päivityselvitykseen saataisiin mukaan muitakin maita kuin nuo viisi kuvassa 5 esitettyä maata.

YHTEENVETO

Tässä esityksessä luodaan katsaus tulipalojen henkilöriskien siedettävän tason arviointiin käyttäen hyväksi tulipalotilastoista saatavia tietoja sekä todennäköisyyspohjaista palonsimulointia. Ehdotettava siedettävän riskin esittämisen riskianalyttinen menetelmä on ns. F-N -käyrä, jonka yleiset perusteet ja soveltaminen tulipalojen henkilöriskeihin esitellään.

KIITOKSET

Tätä tutkimusta on rahoittanut Tekes (päätös nro 40475/03) ja VTT.

LÄHDELUETTELO

1. CPQRA, Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. New York: Center for Chemical Process Safety of American Institute of Chemical Engineers. 1989.
2. Schneider. J. Safety - A Matter of Risk, Cost, and Consensus. Structural Engineering International. No.4. S. 266-269.
3. Litai D. & Rasmussen N. The public perception of risk. The analysis of actual versus perceived risks. Oxford: Plenum Press. 1983. S. 213-224.
4. Korhonen, T, Hostikka, S. & Keski-Rahkonen, O. A Proposal for the Goals and New Techniques of Modeling Pedestrian Evacuation In Fires. 8th International Symposium on Fire Safety Science, 18-23 September 2005, Tsinghua University, Beijing, China. International Association for Fire Safety Science. 12 p. Julkaistaan.
5. VROM (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer). Dutch National Environmental Plan. The Hague. 1988

6. BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft). Handbuch I zur Störfallverordnung StFV. Richtlinien für Betriebe mit Stoffen, Erzeugnissen und Sonderabfällen. Bern. 1991.
7. Health and Safety Executive. Reducing risks, protecting people. Suffolk, Sudbury: HSE Books. 2001. ISBN 0 7176 2151 0.
8. Rasbash, D. J., Criteria for Acceptability for Use with Quantitative Approaches to Fire Safety. Fire Safety Journal. Vol. 8. 1984/85. S. 141-158.
9. Kokkala, M. Rakennusten paloturvallisuussuunnittelu - toiminnallinen lähestymistapa. Espoo: VTT. 2000. 63 s. + liitt. 15 s. (VTT Tiedotteita 2028)
10. Jönsson, R. & Lundin. J. The Swedish case study - different fire safety design methods applied on a high rise building. Lund: Lund Institute of Technology, Department of Fire Safety Engineering. 1998. 81 s. (Report 3099)
11. Hietaniemi, J. Mallintaminen ja sen käyttö palotekniikassa. Palotutkimuksen päivät 2005.
12. Keski-Rahkonen, O., Probability of multiple deaths in building fires according to an international fire statistics study. Human behavior in fire - Proceedings of the First International Symposium. Belfast, Northern Ireland: University of Ulster. 1998. S. 381-391.
13. [1] WASH-1400. Reactor Safety Study - An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants. Washington, D.C.: WASH-1400 NUREG-75/014. 1975.