

RISKIANALYYSIIN PERUSTUVA PALOTURVALLISUUSUUNNITTELU: RISKIANALYYSI AJASTA RIIPPUVAA TAPAHTUMAPUUMALLIA KÄYTTÄEN

Timo Korhonen ja Jukka Hietaniemi
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
PL 1803, 02044 VTT

Tiivistelmä

Tässä artikkelissa esitellään menetelmä rakennuksen paloriskien arvioimiseksi ja sovelletaan sitä valitun esimerkkikohteen rakenteiden palonkestävyyden paloturvallisuusvaikutusten arvioimiseksi. Käytetty riskianalyysimenetelmä edustaa uutta paloriskien arvioimisen lähestymistapaa, jossa oletettu palon kehittyminen ajan mukana otetaan huomioon kaikissa tarkastellun järjestelmän tapahtumien ja prosessien kuvauksissa. Menetelmä yhdistää palon aikana tapahtuvien eri prosessien kehittymisen mallit kuvaukseksi koko tulipalon kehityksestä. Mallin toiminta perustuu systeemin tapahtumapuukuvaukseen, jonka perusteella tulipalon aikakehitys saadaan laskettua käsittelemällä systeemiä Markovin prosessina. Riskien suuruus saadaan määritettyä, kun tulipalon ajallisen kehittymisen kuvaukseen liitetään palon mahdollisten seuraamusten kvantitatiivinen arviointi.

JOHDANTO

Paloilmiöitä ja palon vaikutuksia koskeva ymmärtämys ja tiedon määrä ovat kasvaneet voimakkaasti parin viimeisen vuosikymmenen aikana. Samalla myös tietotekniikan tarjoamat mahdollisuudet suunnitella, laskea ja analysoida paloturvallisuuteen liittyviä tekijöitä ovat kehittyneet huomattavasti. Nämä kehitystrendit ovat mahdollistaneet toiminnallisen lähestymistavan käytön paloteknisessä suunnittelussa ja arvioinnissa, missä tarkastelu lähtee systeemiltä vaadittavasta toiminnasta. Paloturvallisuuden toiminnalliseen lähestymistapaan liittyy tulipalojen aiheuttamien uhkien ja niiden seuraamusten arviointi eli riskien arviointi.

Rakennuksen paloriskit muodostetaan yhdistämällä valituille uhkakuville lasketut riskit. Ensimmäisessä vaiheessa kerätään tarkasteltavan rakennuksen paloriskien arvioinnissa tarvittavat tiedot. Rakennuksen sijainti otetaan huomioon palokunnan saapumisajan määrittämisessä. Rakennuksen tilojen järjestely ja käyttö otetaan huomioon siinä määrin kuin mahdollisten tulipalojen kuvaaminen riittävän yksityiskohtaisesti edellyttää (palokuorma, sytytyslähteet, ovet ja ikkunat, jne.). Tämän jälkeen valitaan tarkasteltavat uhkakuvat (skenaarit) mahdollisten paloskenaarioiden, rakennuksen miehityksen vaihteluiden, vuoden-aikojen, yms. seikkojen joukosta.

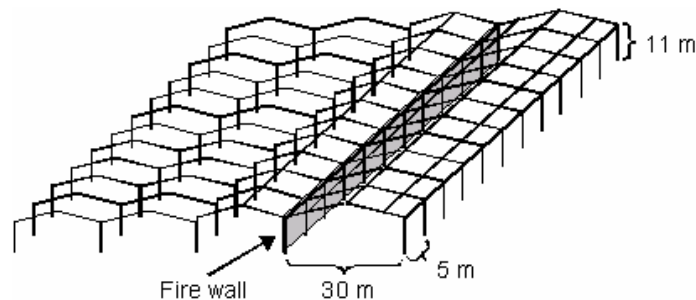
Kunkin valitun skenaarion riskianalyysi tehdään käyttämällä VTT:ssä kehitettyä ajasta riippuvaa tapahtumapuumallia [1,2], jossa tulipalon ajallinen kehitys otetaan huomioon 1) analysoimalla tietyt, mallissa valitut ajanhetket tapahtumapuiden avulla sekä 2) kytkemällä nämä eri hetkien kuvaukset toisiinsa koko palon aikakehityksen kuvaukseksi. Tarkastelun perustana on valitun paloskenaariion kuvaaminen stokastisesti mallinnettuna mitoituspaloona. Tämän jälkeen tarkastelun piiriin valitut tulipalon aikaiset tapahtumat ja prosessit käydään

läpi. Osa näistä tapahtumista ja prosesseista kuvataan laskentamallien avulla, jolloin näihin ilmiöihin liittyvä vaihtelevuus voidaan ottaa huomioon suorittamalla laskennat yhdistettynä Monte Carlo –simulointiin.

Tässä työssä tulipaloa ja sen vaikutusta kohteen kantaviin teräsrakenteisiin kuvataan käyttämällä OZone-vyöhykemalliohjelmistoa [3,4]. Työssä käytetään ns. stokastista mitoituspaloa, eli tulipalon vaihtelevuuden vuoksi sitä mallitetaan Monte Carlo –tekniikalla, eli kullekin paloskenaariolle suoritetaan useita tuhansia OZone-simulointeja. Näiden simulaatioiden suorittamiseen sekä niistä saatavien tulosten analysointiin käytetään VTT:ssä kehitettyä PFS-simulointityökalua (Probabilistic Fire Simulator) [5,6].

KOHDERAKENNUS

Tarkasteltava esimerkkitapaus on tulipalo kuvan 1 esittämän varastorakennuksen suurimmassa osastossa. Rakennus koostuu neljästä palo-osastosta, joista suurimman dimensiot ovat leveys 30 m, pituus 55 m, korkeus seinän vieressä 11 m ja suurin korkeus 15 m. Tämän ja muiden palo-osastojen välissä on palomuri, jolla on kahden tunnin paloluokitus. Tämä Ranskassa oleva halli on teräsrakenteinen (IPE 550 palkit ja HEA 600 pilarit).



Kuva 1. Tutkittu teräsrakenteinen varastohalli.

Hallin katossa on savunpoistoluukut (1 % lattiapinta-alasta) sekä 20 % katosta on tehty tulipalossa sulavasta materiaalista (polykarbonaattia). Tarkasteltavassa esimerkissä tutkitaan varastoon asennettavan sprinklerijärjestelmän vaikutusta riskeihin. Hallia käytetään muovituotteiden varastointiin ja suurimmaksi palokuormamääräksi oletettiin yhteensä 205 tonnia muovituotteita, joista saatava palokuormatiheys on 2780 MJ/m^2 .

Tarkasteltava uhkakuva

Tässä esityksessä sen rajoitetun pituuden vuoksi tarkastellaan vain kohteen yhtä mahdollista skenaariota eikä kohteelle siten pyritä tekemään kattavaa riskitarkastelua vaan pääpaino on käytettävän menetelmän kuvauksessa. Palon oletetaan syttyvän suurimmassa osaston keskellä ja syttymishetkellä varaston oletetaan olevan miehittämätön. Johtuen hallin varastoluonteesta ei siellä olevan vähäisen henkilökunnan poistumiseen palotapauksessa liity suuria riskejä (ovien kapasiteetti ei ole ongelma). Pelastushenkilökunnan riskit liittyvät pääsääntöisesti rakennuksen kantavien rakenteiden kestävyyyteen palotilanteessa, joten työssä keskitytään tarkastelemaan rakenteiden vaurioitumisen vaikutusta halliin. Tarkasteltavan

palotapahtuman oletetaan kasvavan keskimäärin 150 s kasvuajalla maksimipalotehon määräytyessä palokuorman pinta-alasta (keskimäärin 1320 m²) sekä keskimääräisestä pinta-alaa kohti lasketusta palotehosta (560 kW/m²). Palotilan yhden ison lastausoven (4 m × 5 m) oletetaan olevan auki koko palotapahtuman ajan.

AJASTA RIIPPUVA TAPAHTUMAPUUMALLI

Tulipalo on hyvin dynaaminen ilmiö, joten sen kuvaaminen staattisella tapahtumapuulla (tai vikapuulla) on yleensä karkea yksinkertaistus. Ajasta riippuvassa tapahtumapuumallissa (ARTP) tulipalon kesto-aika jaetaan useaan aikajaksoon. Tämä aikajako tehdään niin, että se on tiheä tulipalon alkaessa, jolloin tarkasteltava systeemi kehittyy nopeasti. Myöhemminä hetkinä aikajakoa voidaan harventaa, sillä palo tasaantuu eikä siihen liittyvät todennäköisyydet enää riipu niin voimakkaasti ajasta kuin palon alkuvaiheissa. Tässä työssä ensimmäisten 15 minuutin aikana aikajaksot ovat minuutin pituisia ja sen jälkeen aikajaksojen päätepisteet ovat 20, 25, 30, 45, 60, 90, 120 ja 240 minuuttia.

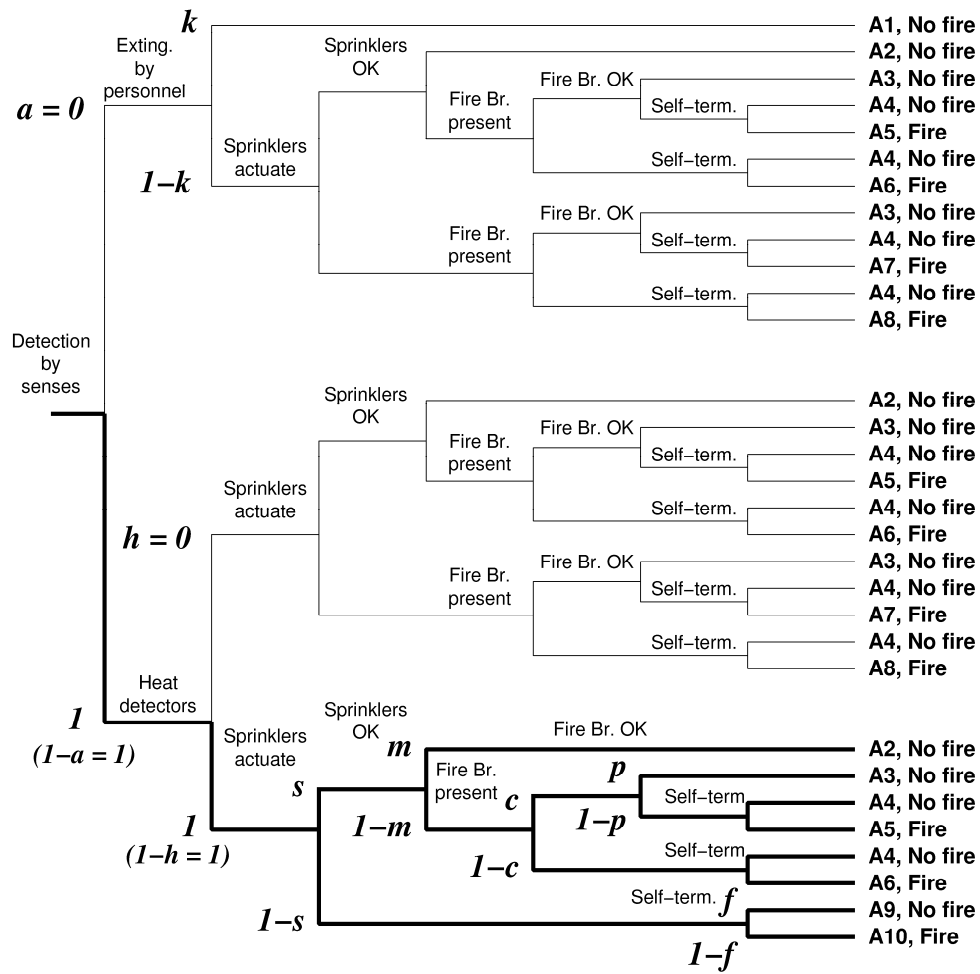
Kuvassa 2 on esitetty työssä kullakin aikajaksolla käytetty tapahtumapuu, jonka avulla otetaan huomioon aktiiviset sammutustoimenpiteet sekä palokuorman loppuminen. Tarkasteltavassa skenaariossa varastohallin oletetaan olevan miehittämätön, jolloin tarvitaan vain tapahtumapuun paksummilla viivoilla esitettyä alaosa. Tapahtumapuussa esiintyvät tilat ovat:

- A_1 : Alkusammutus sammuttanut
- A_2 : Sprinklaus sammuttanut
- A_3 : Palokunta sammuttanut
- A_4 : Sammunut palokuorman loppumiseen, palo on havaittu (mitoituspalo)
- A_5 : Palaa, palokunta ja sprinklaus epäonnistuneet, palo on havaittu
- A_6 : Palaa, sprinklaus epäonnistunut, palokunta ei paikalla, palo on havaittu
- A_7 : Palaa, palokunta epäonnistunut, sprinkleri ei lauennut, palo on havaittu
- A_8 : Palaa, palokunta ei ole paikalla, sprinkleri ei lauennut, palo on havaittu
- A_9 : Sammunut palokuorman loppumiseen, paloa ei ole havaittu (mitoituspalo)
- A_{10} : Palaa, ei havaittu, sprinkleri ei ole lauennut (alkutilanne)

Huomaa, että näistä tilat A_1 , A_7 ja A_8 eivät esiinny tarkasteltavan skenaarion yhteydessä, koska halli ei ole miehitetty eli palo havaitaan vain silloin, kun sprinklerilaitos antaa siitä hälytyksen suoraan palokunnalle. Tapahtumapuun alaosassa esiintyvät (ajasta riippuvat) haarautumistodennäköisyydet ovat seuraavat: $s(t)$ sprinkleri laukeaa, $m(t)$ sprinklerilaitos sammuttaa, $c(t)$ palokunta on palopaikalla valmiina sammuttamaan, $p(t)$ palokunta onnistuu hyökkäyksessään ja $f(t)$ palokuorma on palanut loppuun.

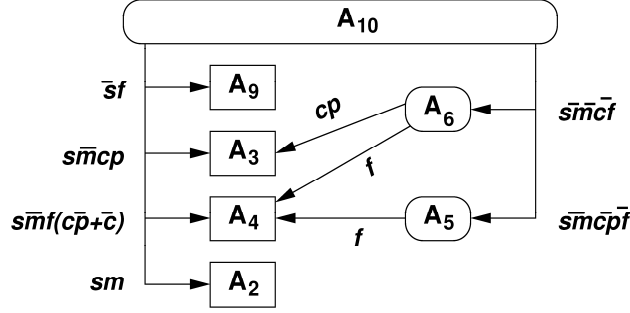
Ajasta riippuvien tapahtumapuiden haarautumistodennäköisyydet ovat ehdollisia todennäköisyyksiä, sillä tiettyä hetkeä vastaavan puun todennäköisyydet riippuvat edellisten ajanhetkien tapahtumapuista. Esimerkiksi sprinklerin aktivoitumista aikavälillä $t_2 - t_3$ kuvaava todennäköisyys $s_3 = s(t_3)$ tarkoittaa ehdollista todennäköisyyttä $P[\text{sprinkleri aktivoituu aikavälillä } t_2 - t_3 \mid \text{ei ole aktivoitunut } t < t_2]$. Tämä todennäköisyys eroaa ajan suhteen kumulatiivisesta todennäköisyysjakaumasta $P[\text{sprinkleri aktivoitunut } t < t_3]$, minkä muotoisia jakaumia saadaan suoraviivaisesti johdetuksi esim. tulipaloa kuvaavien laskennallisten mallien Monte Carlo -simuloinneista. Näitä todennäköisyyksiä sitoo toisiinsa Bayesin

teoreema, jonka avulla jälkimmäisistä arvoista voidaan laskea tapahtumapuissa tarvittavat ehdolliset todennäköisyydet.



Kuva 2. Kullakin ajanhetkellä käytetty tapahtumapuu. Jokaisella tarkasteltavalla ajanhetkellä muodostetaan kuvan mukainen tapahtumapuu käyttäen tätä hetkeä vastaavia haarautumistodennäköisyyksiä.

Kuvan 2 mukaiset eri ajanjaksoihin liittyvät tapahtumapuut eivät ole toisistaan riippumattomia, sillä myöhäisempään ajanjaksoon liittyvä puu jatkaa siitä systeemin tilasta, johon se jäi edellisen aikajakson jälkeen. Näin systeemin tilojen todennäköisyydet $P[A_1], P[A_2], \dots, P[A_{10}]$ kytkeytyvät ehdollisten todennäköisyyksien ketjuksi. Tämän ketjun laskemista voidaan yksinkertaistaa esittämällä tapahtumapuiden kuvaama systeemi Markovin prosessina, jossa tarkastellaan palotapahtuman siirtymiä sen eri tilojen $A_1 - A_{10}$ välillä. Nyt tarkasteltavan skenaarion (tapahtumapuun alaosa) esittämä systeemi on esitetty kuvassa 3. Esimerkiksi systeemin alkutilasta A_{10} (palaa, ei havaittu) tilaan A_2 (sprinklaus sammuttanut) siirrytään seuraavasti: sprinkleri aktivoituu todennäköisyydellä s ja sammutus onnistuu todennäköisyydellä m , jolloin tämän siirtymän todennäköisyys on siis $M_{10 \rightarrow 2} = sm$. Aivan vastaavasti voidaan päätellä muidenkin siirtymien todennäköisyydet.



Kuva 3. Tapahtumapuusysteemiä kuvaava Markovin prosessi, jonka avulla kutakin yksittäistä ajanhetkeä kuvaavat tapahtumapuut yhdistetään. Tila A₁₀ alkutilanne eli tulipalo on syttynyt, mutta sitä ei ole vielä havaittu eikä siten sammutettu ja eikä se ole sammunut itsestään. Tilat A₂, A₃, A₄ ja A₉ (terävänurkkaiset suorakulmiot) ovat systeemin lopputiloja, joissa tulipalo on sammunut itsestään tai se on sammutettu. Viiva todennäköisyyksien päällä tarkoittaa sen komplementtia (esim. $\bar{s} = 1 - s$).

Nämä eri tilojen välisten siirtymien todennäköisyydet tietyllä aikajaksolla t_i voidaan koota matriisiksi M_i

$$M_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{10 \rightarrow 1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{7 \rightarrow 2} & M_{8 \rightarrow 2} & 0 & 0 & M_{10 \rightarrow 2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & M_{6 \rightarrow 3} & 0 & M_{8 \rightarrow 3} & 0 & 0 & M_{10 \rightarrow 3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & M_{5 \rightarrow 4} & M_{6 \rightarrow 4} & M_{7 \rightarrow 4} & M_{8 \rightarrow 4} & 0 & 0 & M_{10 \rightarrow 4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{5 \rightarrow 5} & M_{6 \rightarrow 5} & M_{7 \rightarrow 5} & M_{8 \rightarrow 5} & 0 & 0 & M_{10 \rightarrow 5} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{6 \rightarrow 6} & 0 & M_{8 \rightarrow 6} & 0 & 0 & M_{10 \rightarrow 6} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{7 \rightarrow 7} & M_{8 \rightarrow 7} & 0 & 0 & M_{10 \rightarrow 7} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{8 \rightarrow 8} & 0 & 0 & M_{10 \rightarrow 8} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & M_{10 \rightarrow 9} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{10 \rightarrow 10} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

missä nolasta poikkeavat elementit kuvaavat kaikkia mahdollisia siirtymiä. Mahdottomia siirtymiä (esim. tilasta A₂ tilaan A₁₀, sprinkleri sammuttanut onnistuneesti → palaa havaitsematta) vastaavat elementit ovat nollia kaikilla ajanjaksoilla. Diagonaalilla olevat siirtymät kuvaavat systeemin pysymistä samassa tilassa. Merkitsemällä kunkin tilan todennäköisyydet tietyllä ajanhetkellä t_i pystyvektoriin $\mathbf{P}[A^i] = [P[A_1](t_i), P[A_2](t_i), \dots, P[A_{10}](t_i)]^T$ voidaan systeemin aikakehitys laskea seuraavasta Markovin ketjusta

$$\begin{aligned} \mathbf{P}[A^1] &= M_1 \mathbf{P}[A^0], \\ \mathbf{P}[A^2] &= M_2 \mathbf{P}[A^1] = M_2 M_1 \mathbf{P}[A^0], \\ &\vdots \\ \mathbf{P}[A^n] &= M_n \mathbf{P}[A^{n-1}] = M_n \cdots M_2 M_1 \mathbf{P}[A^0]. \end{aligned} \quad (2)$$

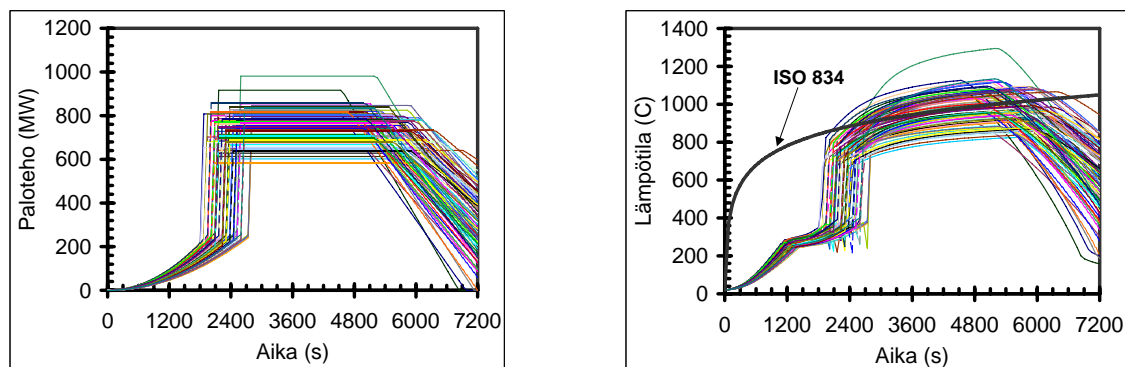
Systeemin alkutilanne hetkellä nolla tiedetään, sillä se on tällöin tilassa A₁₀ eli $\mathbf{P}[A^0] = (0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1)^T$. Sitä seuraavan ajanhetken todennäköisyydet saadaan kertomalla tämä

todennäköisyysvektori tähän aikajaksoon liittyvällä siirtomatriisilla \mathbf{M}_1 . Tämän jälkeen tiedetään todennäköisyydet hetkellä t_l ($\mathbf{P}[A^l]$) ja näistä päästään taas eteenpäin kertomalla seuraavaan aikaväliin liittyvällä Markovin matriisilla, kunnes lopulta saadaan lasketuksi systeemin tila viimeisellä ajanhetkellä t_n .

Stokastinen tulipalon mallitus

Työssä valittu paloskenaario mallitetaan laskennallisesti käyttäen mitoituspaloa, joka kehittyy “vapaasti” eli siten, että siihen ei kohdisteta sammutustoimenpiteitä. Tästä mallinnuksesta saadaan edellä esitetyn ARTP-mallin tarvitsemat haarautumistodennäköisyydet. Aktiivisten sammutustoimien vaikutus huomioidaan siis ARTP-mallilla sen sijaan, että muutettaisiin mitoituspaloja sammutustoimenpiteiden mukaan. Mitoituspaloa kuvataan stokastisesti käyttämällä Monte Carlo –simulointitekniikkaa. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että yhden mitoituspalon sijasta käytetään suurta joukkoa mitoituspaloja, joista kukin edustaa yhtä mahdollista tulipaloa. Näin saadaan esimerkiksi sprinklerin aktivoitumisajalle yksi aika kutakin simuloitua paloa kohti, joista tekemällä histogrammi saadaan aktivoitumisajalle todennäköisyys ajan funktiona, mitä tarvitaan ARTP-mallissa siirtymien todennäköisyyksien laskennassa.

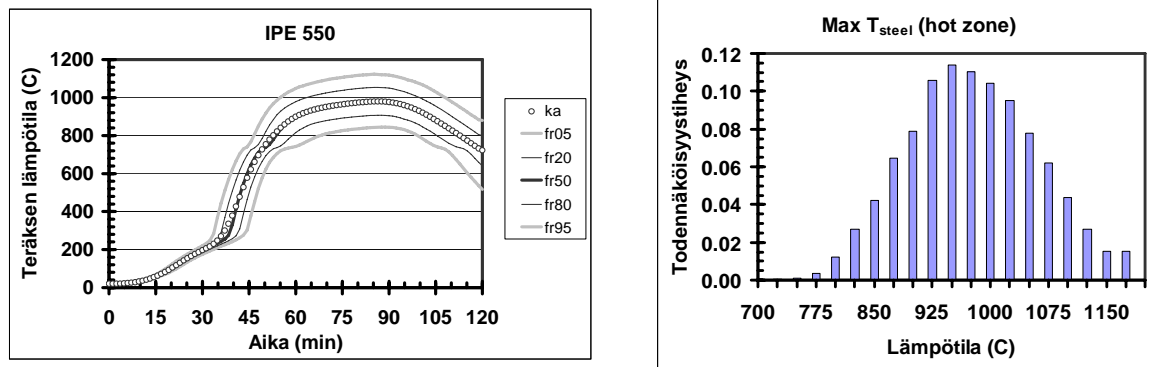
Työssä käytetään laskentatyökaluna vyöhykemallia OZone V2.2, jonka avulla voidaan laskea teräsrakenteiden lämpeneminen suoraan ilman apuohjelmia. Koska mitoituspaloja on mallitettu stokastisesti, niin tällöin vyöhykemallia on jouduttu ajamaan tuhansia kertoja vaihtelevilla mitoituspalon parametreilla. Lisäksi käytetyn vyöhykemallin sisäisiä parametreja myöskin vaihdellaan, jotta niiden vaikutus laskennan lopputuloksiin saataisiin näkyviin. Nämä Monte Carlo –simulaatiot suoritettiin käyttämällä VTT:ssä kehitettyä PFS-työkalua. Kuvaan 4 on piirretty osa kaikkiaan 5000 vyöhykemalliajon palotehokäyristä ja palotilan lämpötiloista. Tilanpuutteen vuoksi varioitavien parametrien valintaa ei tässä artikkelissa selvitetä, sillä tarkoituksena on vain esitellä ARTP-menetelmän toimintaa.



Kuva 4. Käytetyt stokastiset mitoituspalot sekä OZonen laskemat palotilan lämpötilat ajan funktiona. Huomaa, että palotehot ovat OZonen laskemia palotehoja, eli niissä näkyy mallin siirtyminen 2-vyöhykemallista 1-vyöhykemalliin, jolloin paloteho kasvaa voimakkaasti (kaikki palava materiaali syttyy).

Näitä palotilan lämpötiloja vastaavat IPE 550 teräspalkkien lämpötilat ovat esitettynä kuvassa 5. Ne ovat esitetty vasemmalla fraktiileina ja oikealla on esitettynä teräspalkkien maksimilämpötilojen jakaumat. Vasemmalla olevasta teräksen lämpötilakäyristä voidaan laskea palkkien kriittisen lämpötilan 730 C (yksittäinen rakenneosa, Eurokoodi 3 osa 1.2)

saavuttamisen todennäköisyyden aikajakauma, joka on esitetty kuvassa 6 harmaalla viivalla (sortuma). Vastaavanlaiset tulokset saadaan myös HEA 600 pilareille.



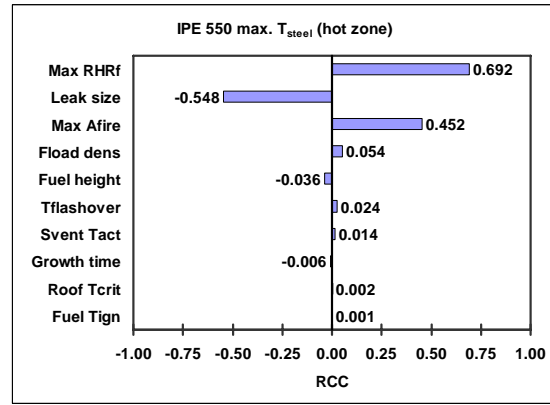
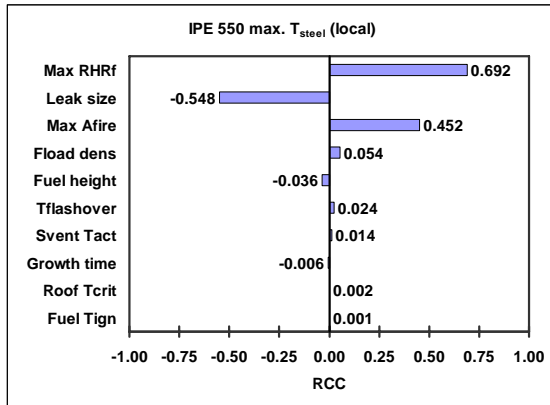
Kuva 5. Teräspalkkien lämpötilat ajan fuktioina (vas.) sekä teräksen maksimilämpötilojen jakauma (oik.). Vasemmalla lämpötilat ovat esitetty fraktiilien avulla, esim. fraktiili 95 % tarkoittaa sitä, että 95 % tapauksista teräksen lämpötila on alle tämän käyrän.

Kuvassa 6 on esitetty MC-simuloinneissa varioitavien parametrien vaikutus laskennan lopputuloksiin korrelaatiokertoimina. Varioituja suureita olivat muun muassa maksimi paloteho per pinta-ala (Max RHRf), rakennuksen vaipan vuodot (Leak size), varastoidun tavarantoiminnan lattiapinta-ala (Max Afire), palokuorman tiheys (Flood dens), mitoituspalon neliöllinen kasvuaika (Growth time), jne. Teräspalkkien maksimilämpötiloihin vaikuttavat eniten palokuorma: varastoidun materiaalin lattiapinta-ala sekä tavarantoiminnan paloteho per lattiapinta-ala määräävät mallissa maksimipalotehon, joka tietenkin vaikuttaa voimakkaasti teräksen lämpötilaan. Lisäksi halliin tulevan ilman määrä vaikuttaa palotilan lämpötilaan ja sitä kautta teräksen maksimilämpötilaan. (Mallissa palo on polttoainerajoittunut, sillä sulavan kattomateriaalin ansiosta palo saa riittävästi happea. Tällöin palotilaan tuleva lisäilma itse asiassa jäädyttää sitä, eli tästä syystä korrelaatio on negatiivinen.)

Kohderakennuksen riskianalyysi

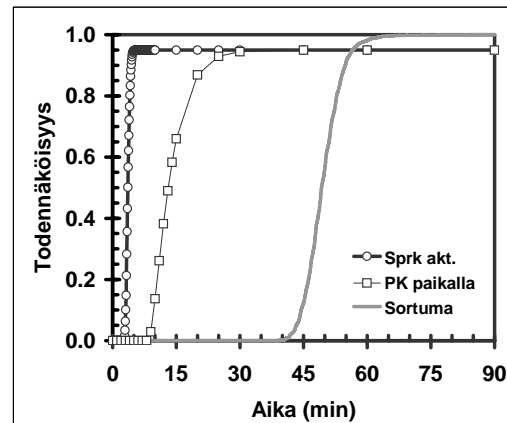
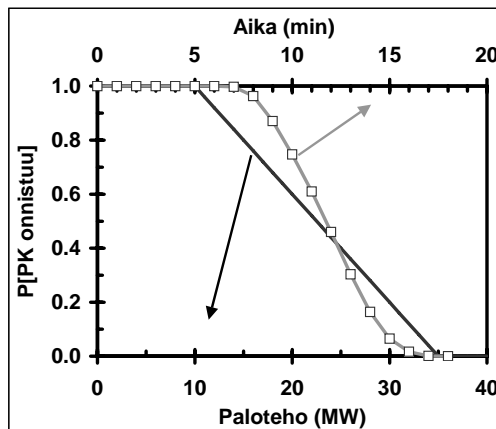
Kohteessa olevien sprinklerien toiminta ($RTI = 50 \text{ ms}^{-1/2}$, $T_{\text{act}} = 60 \text{ C}$) mallitettiin käyttämällä Alperin korrelaatioita ja ratkaisemalla sprinklerin lämpötasapainoyhtälö. Stokastisia mitoituspaloja vastaavat aktivoitumisaikajakauma on esitetty kuvassa 7.

Palokunta saa hälytyksen suoraan sprinklerilaitokselta. Palokunnan lähtövalmiusajan ja ajoajan (5 km matka) käytetään Tillanderin ja Keski-Rahkosen [7] selvittämiä palokuntien saatavuuksia. (Koska käytettävissä ei ole Ranskan tietoja, niin tässä esimerkissä käytetään Uudenmaan läänin arvoja.) Lähtövalmiusajan ja ajoajan lisäksi palokunnalta menee palo- paikalla vielä hiukan aikaa ennen sammutuksen alkamista. Särdaqvistin [8] mukaan tämä aika on yleensä suhteellisen lyhyt muissa kuin asuntopaloissa, keskiarvon ollessa 2 minuuttia ja hajonnan 2,8 minuuttia. Tämä jakauma on hyvin vino ja sitä on tässä työssä mallitettu gammajakaumalla, jonka keskiarvo ja hajonta ovat molemmat 2 minuuttia. Laskemalla nämä kolme aikaa yhteen saadaan lopulta kuvassa 7 esitetty aikajakauma palokunnan sammutustoimenpiteiden alkamisajalle.



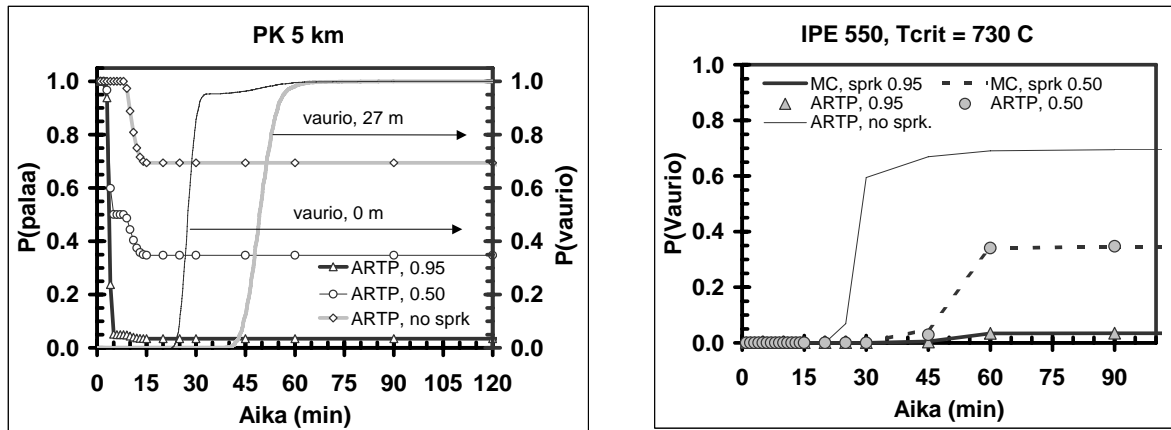
Kuva 6. PFS+OZone simulaatioista saatavat Spearmanin korrelaatiokertoimet.

Käyttämällä kuvassa 7 esitettyjä todennäköisyyksien aikajakaumia voidaan laskea ARTP-mallin siirtymämatriisi (kaava (1)) ja laskea systeemin aikakehitys ja lopputila käyttämällä kaavassa 2 esitettyä Markovin ketjua. Kuvassa 8 on esitetty tämän laskennan antamat tulokset ajan funktiona. Kuvaan on havainnollisuuden vuoksi merkattu kolme eri tapausta: Sprinklerien toimintavarmuus 95 %, 50 % ja ei sprinklausta, jotta eri aktiivisten sammutustoimenpiteiden vaikutus saataisiin näkyviin kuvassa. Rakennuksen sortumisen todennäköisyyksiksi saadaan näissä tapauksissa 0,035, 0,35 %, ja 0,69 per yksi syttynyt palo.



Kuva 7. Palokunnan sammutuksen onnistuminen (vasemmalla) sekä tapahtumapuiden muiden haarojen todennäköisyyksien aikariippuvuus (oikealla). Kuviin ei ole esitetty palokuorman loppumista, sillä se tapahtuu vasta viimeisen tarkasteluajavälin (120 – 240 min) aikana.

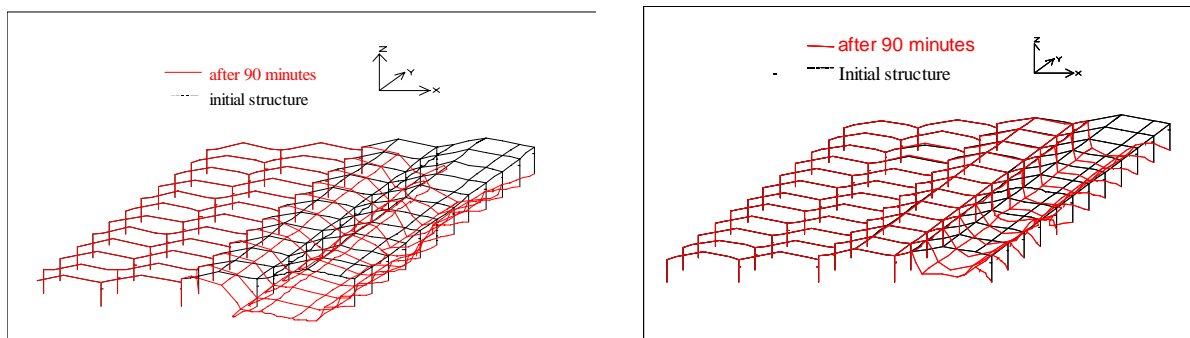
Edellä käytetty yksinkertainen teräsrakenteiden yksittäisten osien kriittisiin lämpötiloihin perustuva vaurioiden mallintaminen ei anna kuvaa mahdollisten vaurioiden vakavuudesta. Alla kuvassa 8 on tarkasteltu koko halliin levinneen palon vaikutusta kantaviin rakenteisiin kahdessa eri suunnittelutapauksessa: alkuperäinen (määräysten mukainen) rakenne sekä toiminnallisen mitoituksen mukainen ratkaisu, missä palomuurissa olevat pylväävät on palo-suojattu ja sivuseiniä vakautta parannettu [9]. Toiminnalliseen mitoitukseen on käytetty tässä työssä PFS+OZone:lla laskettuja teräksen lämpötiloja.



Kuva 8. ARTP –analyysin tulokset tarkastellussa paloskenaariossa. Vasemmalla on esitetty tulipalon sammuttamisen aikakehitys sekä stokastiselle mitoituspaloille lasketut vaurioitumisjakaumat. Oikealla on menetelmän tuottama riskiarvio rakenteen vaurioitumiselle, kun vaurioitumiskriteerinä on syttymän yläpuolisen palkin pettäminen. Tulos saadaan yhdistämällä vasemmalla oleva ARTP menetelmällä laskettu tulipalon aikakehitys vaurioiden syntyneen aikakehitykseen (ohut musta viiva vasemmalla olevassa kuvassa).

LOPPUSANAT

Tässä artikkelissa on esitetty VTT:ssä kehitetty ajasta riippuva tapahtumapuut –menetelmä rakennuksen paloriskien arvoimiseksi. Menetelmän perustana on riskitarkasteluun mukaan otettavien mahdollisten palotapahtumien mallittaminen käyttäen stokastisia mitoituspaloja. Artikkelissa ei ole pyritty kohderakennuksen paloriskien kattavaan arvioimiseen vaan on valittu eräs mahdollinen paloskenaario ja käytetty tätä havainnollistamaan käytettyä menetelmää. Käytetty menetelmä ottaa huomioon myös aktiiviset toimenpiteet palon kehitykseen passiivisten järjestelmien lisäksi. Menetelmän hyviä puolia ovat sen suhteellisen selkeä läpinäkyvyys (tapahtumapuut) sekä se, että se ottaa eksplisiittisesti huomioon palotapahtumaan liittyvien tapahtumien ja toimenpiteiden joskus hyvinkin voimakkaat aikariippuvuudet.



Kuva 9. Kohteen rakenteiden 3D simulointien tulokset kahdelle eri palotapaukselle. Vasemmalla alkuperäinen (määräysten mukainen) rakenne ja oikealla rakenne, jossa palomuurissa olevat pylväät ovat palosuojatut. Kuvista nähdään, että palomuri yksistään ei kykene estämään palon leviämistä viereiseen palo-osastoon, mikäli siinä olevia pylväitä ei palosuoja.

KIITOKSET

Tässä artikkelissa esitettyä työtä ovat rahoittaneet European Coal and Steel Community (ECSC Steel RTD Programme, Contract No.: 7210-PR-251), Rautaruukki Group ja Wood Focus Finland sekä VTT. PFS+Zone simulointityökalu kehitettiin yhdessä ProfilARBEDin ja Liegen yliopiston kanssa. Kiitämme erityisesti Louis-Guy Cajot'a (ProfilARBED) ja Jean-François Cadorinia (Liegen yliopisto) heidän panoksestaan tähän työhön. Rakenteen tulipalonaikainen mallitus tehtiin CTICM:n 'Fire Engineering and Research' -osastossa, mistä kiitokset Daniel Joueux'lle, Olivier Lecoq-Jammes'lle ja Sylvie Bonnot'lle.

LÄHDELUETTELO

1. Korhonen, T., Hietaniemi, J., Baroudi, D. & Kokkala, M. Time-Dependent Event-Tree Method for Fire Risk Analysis: Tentative Results. Teoksessa: 7th International IAFSS Symposium Proceedings, Worcester 16 – 21 June 2002 (in print).
2. Hietaniemi, J., Baroudi, D., Korhonen, T., Björkman, J., Kokkala, M. & Lappi, E. Yksikerroksisen teollisuushallin rakenteiden palonkestävyyden vaikutus paloturvallisuuteen. Riskianalyysi ajasta riippuvaa tapahtumapuumallia käyttäen. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 2002. 95 s + liitt. 51 s. (VTT Tiedotteita 2123.)
3. Cadorin, J.-F. & Franssen, J.-M. A tool to design steel elements submitted to compartment fires - OZone V2.Part 1:pre-and post-flashover compartment fire model. Fire Safety Science, 2003. Vol. 38, nro. 5, s. 395-427. ISSN 0379-7112.
4. Cadorin, J.-F. Pintea, D., Dotreppe, J.-C. & Franssen, J.-M. A tool to design steel elements submitted to compartment fires - OZone V2.Part 2: Methodology and application. Fire Safety Science, 2003. Vol. 38, nro. 5, s. 429-451. ISSN 0379-7112.
5. Hostikka, S. & Keski-Rahkonen, O. Probabilistic Fire Simulator – Monte Carlo Simulation Tool for Fire Scenarios. Teoksessa: Fire Safety Research (FISRE), Final Report. VTT Technical Research Centre of Finland, 2002. S. 205-210. (VTT Research Notes 2164.)
6. Hostikka, S. & Keski-Rahkonen, O. Probabilistic simulation of fire scenarios. Nuclear Engineering and Design, 2003. (In Press, Corrected Proof, Available online 21 May 2003.)
7. Tillander, K. & Keski-Rahkonen, O. Palokunnan saatavuuden merkitys rakennuksen paloriskitarkastelussa. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 2000. 200 s. + liitt. 55 s. (VTT Tiedotteita 2013.)
8. Särqvist, S. Real Fire Data: Fires in non-residential premises in London 1994-1997. Lund: Lund University, 1998. 59 s. (LUTVDG/TVBB-7003-SE.)
9. Hietaniemi, J., Korhonen, T., Joyeux, D. & Ayme, N. Risk-based fire safety engineering approach to obtain balanced structural fire resistance requirements. Teoksessa: Proceedings of 4th International Conference on Fire and Explosion Hazards, Londonderry, 8-12 September 2003, to be published.