

Autopalojen mallinnus ja sprinklerit: Tutkimus Eurokoodi-kertoimien paikkansapitävyydestä sprinklereille

TkK Mikko Partanen

Tampereen teknillinen yliopisto, Metallirakentamisen tutkimuskeskus, Tampere

1 Johdanto

Paloturvallisuus on olennainen osa rakenteiden suunnittelua, joista yksi tyypillinen sovelluskohde nykypäivänä on avoin tai suljettu parkkihalli. Autopaloja on tutkittu jo useiden vuosien ajan alkaen VTT:n tutkimuksista vuonna 1991 kohdistuen autojen palotehoon (Mangs & Loikkanen, 1991). Tämän jälkeen autopaloista on tehty monia mielenkiintoisia tutkimuksia (esim. Schleich ym, 1997), joiden tuloksia on myös koottu yhteen tilastojen muodossa (Li, 2004). Kokonaisten autojen lisäksi on myös tutkittu autojen eri osia, kuten esimerkiksi renkaita (Gratkowski, 2012) ja moottorituloja (Weisenpacher ym, 2010)

Yleensä autopalojen mallinnuksen tärkein asia on selvittää ajan ja palotehon välinen yhteys syttymishetkestä eteenpäin. Monissa tapauksissa mallintamisessa on hyödynnetty laskennallista virtausdynamiikkaa (CFD) ja suurin osa analyyseistä, kuten esimerkiksi (Halada ym, 2012) on toteutettu käyttämällä palon mallinnusohjelmaa nimeltä FDS (Fire Dynamics Simulator) (Mc Grattan ym, 2010). Tässä tutkimuksessa palot mallinnetaan FDS -ohjelmalla.

Rakenteellisessa palomitoituksessa kehittynein lähestymistapa on käyttää todennäköisyys-jakautumia. Varmuuskertoimet mekaanisille kuormille, palolle, lujuuksille sekä passiivisille että aktiivisille palontorjuntatoimenpiteille määritetään siten, että rakennuksen elinkaaren aikana tapahtuvan onnettomuuden tilastollinen todennäköisyys on alle Eurokoodin esittämän vaatimuksen. Tätä menetelmää on käyttänyt esimerkiksi (Schaumann ym, 2010) avoimissa parkkihalleissa. Vaihtoehtoisesti Eurokoodi sallii käytettäväksi myös kokemusperäisiin tuloksiin pohjautuvaa mallia, jolloin käytetään todellisia palotehokäyriä määritettäessä tilan lämpötiloja. Eurokoodin (SFS-EN 1991-1-2, 2003) ohjeellinen Liite E tarjoaa palokuormille pienennyskertoimia käytettäessä tilassa sprinklereitä. Kun pienennyskertoimien vaikutus kaasun ja rakenteen lämpötiloihin on määritetty, rakenteen kestävyys voidaan tarkastaa koko palon ajanjakson ajalta. Useimmissa tapauksissa rakenteen mekaaniset ja lämmönsiirtymisanalyytit voidaan tehdä itsenäisesti.

Autopaloista ei ole tarjolla suunnittelutietoa nykyisessä Eurokoodissa, vaikka niiden laskennalliset menetelmät ovat laajalti hyväksytyjä ja laboratoriotesteissä todennettuja ympäri Eurooppaa ja koko maailmaa. Tämän tutkimuksen yksi päätavoitteista on tarjota taustatietoa autopaloihin liittyen ja tutkia Eurokoodissa SFS-EN 1991-1-2 mainittujen palokuormien pienennyskertoimien paikkansapitävyyttä, kun tilaan asennetaan sprinklereitä. Kyseistä menettelytapaa ei ole vielä hyväksytty käytettäväksi läheskään kaikissa Euroopan maissa Suomi mukaan lukien.

2 FDS–malli ja sen vahvistaminen

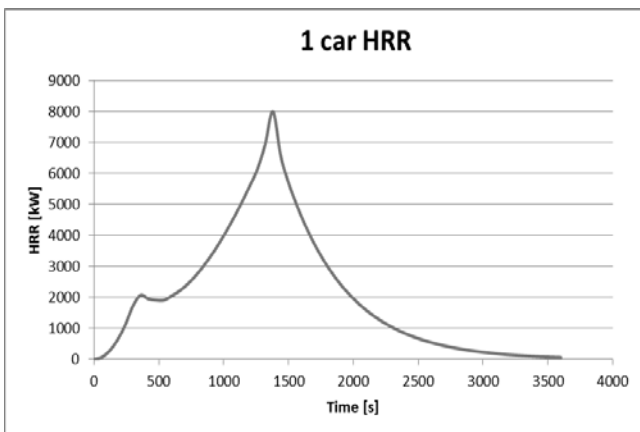
2.1 Autopalojen FDS -malli

Mallissa käytetään ajoneuvoja, jotka kuuluvat massan ja palossa vapautuvan energian vuoksi kategoriaan 2 (Schleich ym, 1997). Ajoneuvojen sisällä on palava taso kooltaan 1,8 x 4,8 m² (Schleich, 2010), joka sijaitsee 0,5 m lattiatason yläpuolella. Palava taso ja renkaat synnyttävät

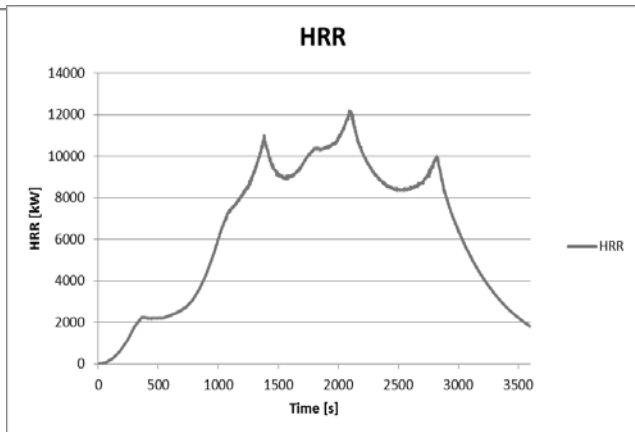
kuvan 2.1 mukaisen palotehokäyrän, jonka piikki on arvossa 8 MW (Schleich ym, 1997) 25 minuutin kuluttua syttymishetkestä. Käyrän muotoa on viilattu siten, että yhden auton palossa vapautuva energia on 7500 MJ kategoriataason vaatimuksen mukaisesti. Kaikki kolme ajoneuvoa sijaitsevat 0,6 m etäisyydellä toisistaan ja ne syttyvät 12 minuutin välein (Joyeux ym, 2001). Jotta palon leviäminen olisi mahdollista ajoneuvosta toiseen, palava taso ja renkaat ovat syttyvää materiaalia niille tyypillisillä materiaaliominaisuuksilla varustettuna. Tarkemmat tiedot mallista (Heinisuo & Partanen, 2013). Renkailla on myös oma palotehokäyrä (Gratkowski, 2012), jonka syttymislämpötilaksi on asetettu 250 °C. Yleensä ajoneuvojen renkaat syttyvät lämpötilavälillä 371 - 425 °C, mutta mallin paremman toiminnan kannalta syttymislämpötilaa on hieman laskettu.

Ikkunat rikkoutuvat lämpötilassa 300 °C (Weisenpacher ym, 2012). Tuulilasi on materiaaliltaan laminoitua lasia ja muut ikkunat karkaistua lasia. Ajoneuvossa, joka syttyy ensin, sivuikkunat ovat auki, jotta palosta ajoneuvon sisällä ei muodostu happirajoitteista. Palo leviää rikkoutuvien ikkunoiden ja palavien renkaiden välityksellä ajoneuvosta toiseen niin, että toinen ajoneuvo syttyy noin 720 sekuntia (12 min) ja kolmas noin 1440 sekuntia (24 min) ensimmäisen ajoneuvon syttymisestä. Jotta syttymiset saadaan muokattua oikeaan lämpötilaan, palomalleja on kehitetty kaksi kappaletta ilman sprinklereitä. Ensimmäisessä mallissa ajoneuvot syttyvät palamaan 12 minuutin välein riippumatta viereisen ajoneuvon palotilanteesta. Toinen malli sen sijaan huomioi viereisen palon ominaisuudet siten, että palon leviäminen tapahtuu ikkunoiden ja renkaiden kautta pitäen palon kuitenkin sellaisena, että ajoneuvojen syttymisväli on edelleen noin 12 minuuttia. Tällä mallilla pystytään huomioimaan sprinklauksen viilentävä vaikutus pintalämpötiloihin ja palon leviämiseen. Mallia voidaan myös käyttää muihin tarkoituksiin, kuten esimerkiksi tilanteisiin, joissa halutaan tutkia palon leviämistä muihin objekteihin kuin autoihin.

Auton runko on mallinnettu palamattomana materiaalina, jona käytetään seostettua alumiinimetallia (Bertram & Buxmann, 2007). Renkaiden ympärillä on ilma-aukkoja samoin kuin keulassa. Kahdessa renkaassa ja palotason pinnalla ajoneuvon sisällä on termoelementit mittaamassa palon leviämistä. Hilakokona on käytetty 100 x 100 x 100 mm³ ajoneuvojen alueella, jolloin resoluutio on 25 (Heinisuo ym, 2008) eli verkko on riittävän tiheä ja tarkka luotettaviin tuloksiin. Osissa mittauksista, mallin reunoilla hilakokona on ollut 200 x 200 x 200 mm³ laskennan nopeuttamiseksi. Kuvassa 2.1 ja 2.2 on esitetty yhden ja kolmen vierekkäisen ajoneuvon palotehokäyrä.



Kuva 2.1 Yhden ajoneuvon palotehokäyrä.

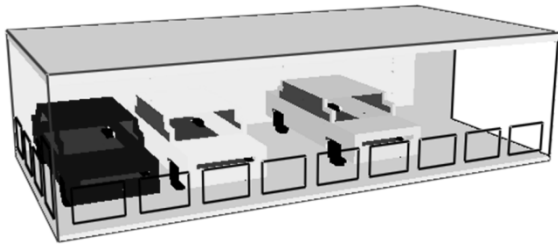


Kuva 2.2 Yhdistetty palokäyrä kolmelle ajoneuville.

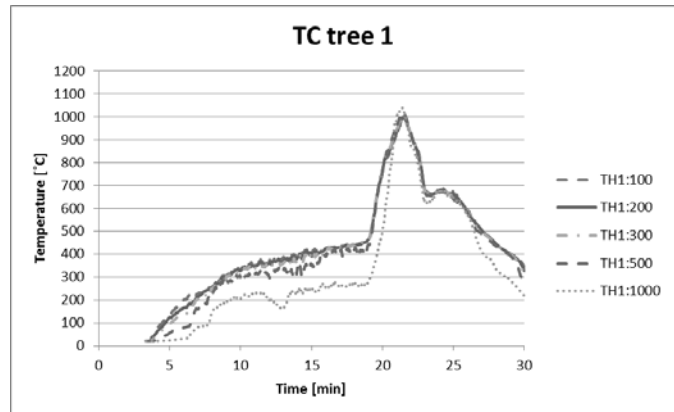
2.2 Kehitetyn mallin validointi

FDS -malli validoitiin britannialaisen tutkimuskeskuksen nimeltä BRE (2009) tekemien autopalokokeiden pohjalta. Ensimmäisessä testissä kolme ajoneuvoa, Renault Laguna (ajoneuvo

1), Renault Clio (ajoneuvo 2) ja Ford Mondeo Estate (ajoneuvo 3), poltettiin ilman sprinklereitä. Palon ajoneuvot mallinnettiin kuulumaan kategoriaan kaksi, kuten edellä kuvattiin. Ympäröivä tila ja ajoneuvojen väliset etäisyydet mallinnettiin samanlaisiksi kuin alkuperäisessä testiympäristössä. Mallin perustilanne on esitetty kuvassa 2.3.



Kuva 2.3 BRE-testin geometria, ajoneuvo 1 vasemmalla.



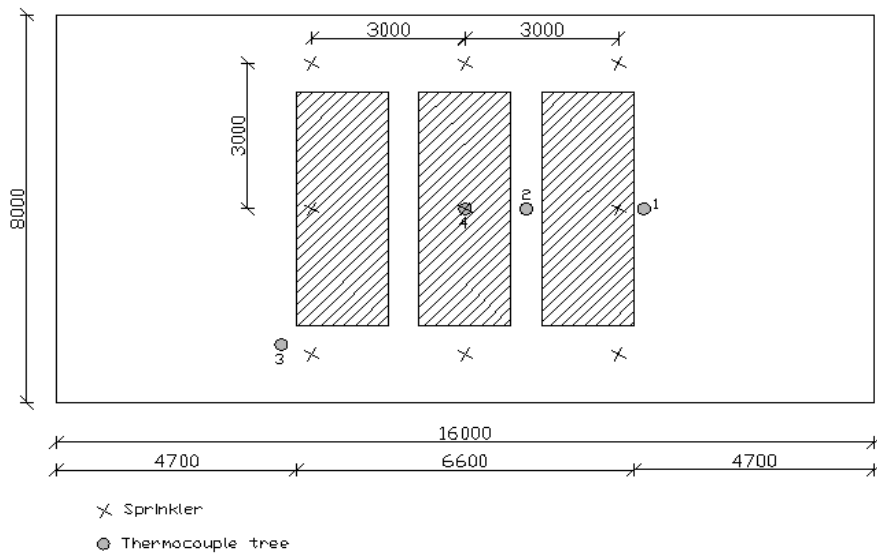
Kuva 2.4 Lämpötiloja termopuussa 1.

Palo syttyi ajoneuvosta 1 leviten eteenpäin. Lämpötiloja mitattiin mallissa termopuiden avulla, kuten myös todellisessa tilanteessa. Kuva 2.4 havainnollistaa lämpötiloja puussa 1, kun mittarit olivat 100, 200, 300, 500 ja 1000 mm etäisyydellä katon alapinnasta. Lämpötilat kaikissa mallin termoelementeissä olivat kutakuinkin samat verrattuna todelliseen palokokeeseen.

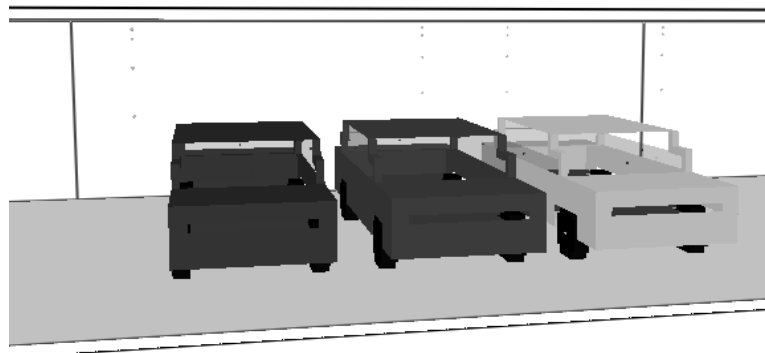
Testin toisessa vaiheessa otettiin mukaan sprinklerit. Tällä kertaa poltettavina ajoneuvoina olivat Renault Grand Escape, Seat Ibiza ja Land Rover Freelancer. Nämä ajoneuvot mallinnettiin kuuluvaksi kategoriaan kaksi. Tilassa oli kuusi sprinkleriä, joiden vesivuo 5 mm/min OH2 sprinkleriluokan mukaan. Yhden sprinklerin suojausala oli 12 m². BRE (2009) –testissä ainoastaan yksi ajoneuvo syttyi, kuten kävi myös oman FDS-mallin simulaatiossa. Lämpötiloja vertailtaessa havaittiin, että mallin kahdessa termopuussa lämpötilat olivat korkeammat ja yhdessä puussa alhaisemmat kuin BRE (2009) -testissä. Syynä tähän oli se, että ainoa palava ajoneuvo oli Renault Grand Escape, joka kuuluu ajoneuvokategoriaan 5 (luovutettu lämpöenergia 12000 MJ), kun taas simulaatiomallissa käytettiin kategorian kaksi ajoneuvoa (7500 MJ). Näiden energioiden suhde $12000/7500 = 1,6$. Sama suhdeluku on myös maksimilämpötilojen välillä $800/500 = 1,6$, joten malli toimii tarkoituksenmukaisesti.

3 Oma tutkimus palon leviämisestä kolmen ajoneuvon välillä

Kolmen kategorian kaksi ajoneuvon paloskenaario mallinnettiin parkkihallitilaan, jonka koko oli 8 x 16 m² ja korkeus 3 m. Tila oli avoin eli seiniä ei ollut lainkaan. Lattia ja katto olivat 100 mm paksua palamatonta betonia. Tilaan asetettiin termopuita neljä kappaletta ja yhdeksän samanlaista sprinkleriä kuin validointimallissa (kuva 3.1 & kuva 3.2). Sprinklereiden vesivuona käytettiin 45 l/min korvaamaan 60 l/min (BRE-testi), koska yhden suuttimen suojausala oli tällä kertaa 9 m². Parkkihalleille vaadittu sprinkleriluokitus on OH2. Ajoneuvot mallinnettiin kappaleen 2.1 mukaisesti.

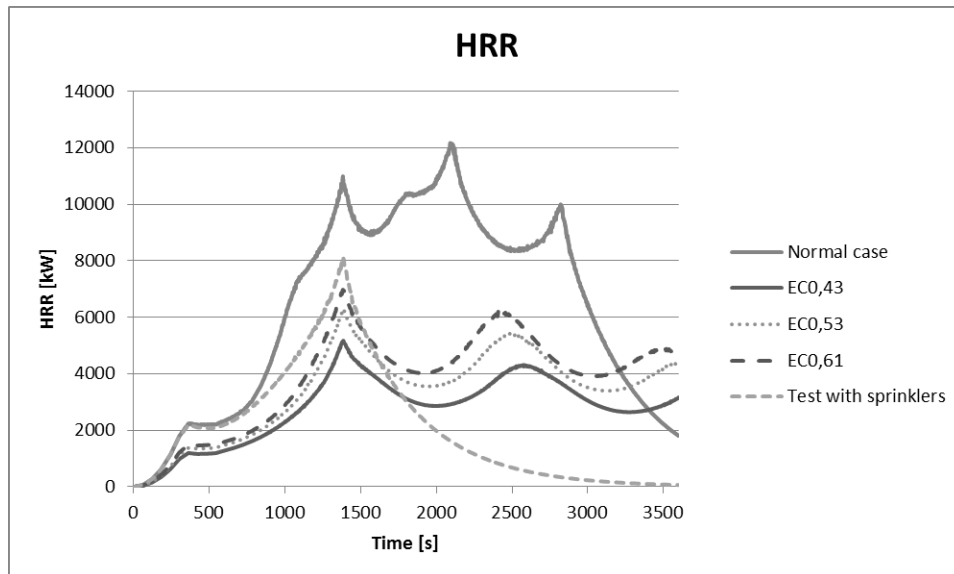


Kuva 3.1 Sprinklereiden ja termopuiden sijainti ajoneuvoihin nähden.



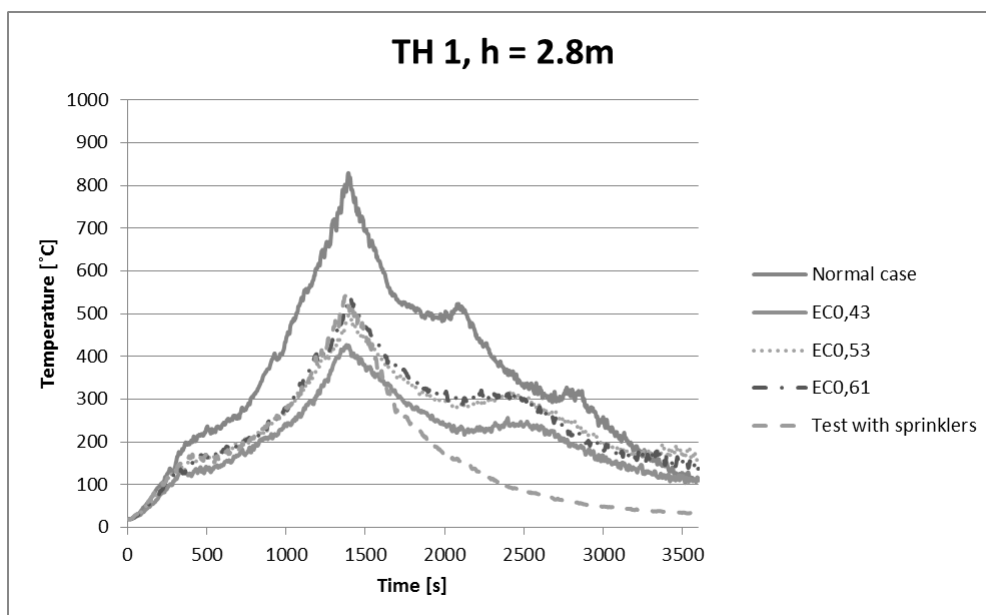
Kuva 3.2 Oman palomallin lähtötilanne. Oikeanpuoleinen ajoneuvo sytty ensiin.

Oma palomalli mallinnettiin sekä sprinklereiden kanssa että ilman. Sen jälkeen palotehoa laskettiin kertoimien avulla Eurokoodin SFS-EN 1991-1-2 ohjeiden mukaisesti. Automaattisella sprinklerijärjestelmällä pystytään alentamaan suunniteltua palokuormaa kertoimella 0,61. FDS -mallissa tämä vähennyskerroin on huomioitu pienentämällä palavan tason HRRPUA (Heat Release Rate per Unit Area) -arvoa eli palotehoa pinta-alayksikköä kohden. Mallin pienennyskerroina käytettiin tällöin 0,69, joka saadaan numeerisesti integroimalla palotehokäyrää koko pinnan yli, jolloin mallin käyrän (nimetty EC0,61) pinta-alaksi tulee 61 % alkuperäisen palotehokäyrän muodostamasta pinta-alasta. Samaa tekniikkaa on käytetty kahdessa muussa Eurokoodikerroin-simulaatiossa EC0,53 ja EC0,43, joihin on sisällytetty myös vesilähteiden lukumäärän vaikutus. Palotehokäyrän kuvaajat simuloituissa tapauksissa on esitetty kuvaajassa 3.3, jossa on havainnollistettu alkuperäinen tilanne (Normal case), Eurokoodivähennykset sekä testi sprinklereillä.



Kuva 3.3 Paloskenaarion palotehokäyrät.

Kuvasta 3.3 voidaan nähdä, että Eurokoodin SFS-EN 1991-1-2 pienennyskertoimilla palon leviäminen ajoneuvosta toiseen on mahdollista, kun tilassa on sprinklereitä. Sen sijaan oma simulaatiomalli ja todellinen BRE -testi osoittavat, että syttymistä ei tapahdu. Esimerkki eräästä termopuun mittauspisteestä on esitetty kuvassa 3.4.



Kuva 3.4 Simulaatioiden lämpötiläkäyriä.

Kuvasta 3.4 voidaan havaita, että sprinklerit korvaavan Eurokoodin SFS-EN 1991-1-2 pienennyskerroin palokuormalle tuottaa saman maksimilämpötilan kuin tilanne, jossa sprinklerit ovat toiminnassa, kun on kyse palotehokäyrän ensimmäisestä piikistä. Eurokoodi-metodi on siis tältä osin luotettava suunnittelun väline, jos palon maksimilämpötilat syntyvät ensimmäisen palotehopiikin aikana. Metodien tuottamat lämpötilat piikin jälkeisellä ajanjaksolla ovat kuitenkin hyvin konservatiivisia tulosten perusteella, koska kerroin ei huomioi palon leviämisen mahdollisuutta. Simulaatiomallin käyttökelpoisuuden kattavampi arviointi ja monipuolisemmat ja tarkemmat analyysit tuloksista ovat luettavissa lähteestä (Heinisuo & Partanen, 2013).

Lähteet

- Bertram, M., Buxmann, K., etc., 2007, Improving Sustainability in the Transport Sector Through Weight Reduction and the Application of Aluminium, International Aluminium Institute (IAI), 55 pages
- BRE, 2009, Martin M., Fire Spread in Car Parks, Final Research Report BD 2552 (D14 V1)231-569, 16.2.2009, 116 pages
- Gratkowski, M.T., 2012, Burning Characteristics of Automotive Tires, Fire Technology, United States Department of Justice, Bureau of Alcohol, Tobacco, Firearms and Explosives (ATF), Fire Research Laboratory (FRL), DOI: 10.1007/s10694-012-0274-9
- Haack et.al., 2005, Technical Report – Part 1. Design Fire Scenarios, Thematic Network, FIT – Fire in Tunnels, The Fifth Framework Programme of the European Community ‘Competitive and Sustainable Growth’. Contract no G1RT-CT-2001-05017
- Halada, L., Weisenpacher, P., Glasa, J., 2012, Computer Modelling of Automobile Fires, Advances in Modeling of Fluid Dynamics, Dr. Chaoqun Liu (Ed.), ISBN: 978-953-51-0834-4, InTech, DOI: 10.5772/48600
- Heinisuo, M., Laasonen, M., Hyvärinen, T., Berg, T., 2008, Product modeling in fire safety concept, effect of grid sizes and obstacles to steel temperatures, IABSE Helsinki 2008 Congress
- Heinisuo, M., Partanen, M., 2013, Modeling of Car Fires with Sprinklers, Research Report, Tampere University of Technology, Faculty of Business and Built Environment, Tampere, Internet: <http://URN.fi/URN:ISBN:978-952-15-3025-8>
- Joyeux, D., Kruppa, J. Cajot, L.G. Schleich, J.B. Van de Leur, P. Twilt, L., 2001, Demonstration of real fire tests in car parks and high buildings, European Research Contract n° 7215 PP 025, Final report
- Li, Y., 2004, Assessment of Vehicle Fires in New Zealand Parking Buildings, MEFÉ Thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand
- Mangs, J., Loikkanen, P., 1991, Fire tests in passenger cars, VTT Research Report No.TSPAL00455/90, VTT Espoo, Finland
- Mc Grattan, K., et al., 2010, Fire Dynamics Simulator, Technical reference guide. National Institute of Standards and Technology, version 5.5, USA
- SFS-EN 1991-1-2, 2003, Eurocode 1: Actions on structures, Part 1-2: General actions, Actions on structures exposed to fire, CEN, Brussels
- Schaumann, P., Sothmann, J., Albrecht, C., 2010, Safety concept for structural fire design – application and validation in steel and composite construction, Proceedings of 11th International Seminar of Fire Protection, June 2010, Leipzig
- Schleich, J.B., Cajot, L.G., Franssen, J.M., Kruppa, J., Joyeux, D., Twilt, L., Van Oerle, J., Aurtenetxe, G., 1997, Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in closed car parks (1997), EUR 18867EN, Report.
- Shleich, J.B, 2010, Modern Fire Engineering, Fire Design of Car Parks, Arcelor Profil, Luxembourg Research Centre. (Internet publication)
- Weisenpacher, P., Glasa, J., Halada, L., 2010, Computer simulation of automobile engine compartment fire. Proc. of the Int. Congress on Combustion and Fire Dynamics (J. A. Capote, ed.). Santander: GIDAI - Fire Safety - Research and Technology, p. 257-270. ISBN 978-84-86116-23-1
- Weisenpacher, P., Glasa, J. and Halada, L., 2012, Parallel simulation of automobile interior fire and its spread onto other vehicles, Fire Computer Modeling: international congress, [Santander, 19 de 2012]/ edited by Jorge A Capote, Daniel Alvear, ISBN 978-84-86116-69-9, 2012, pp. 329-338