

METSÄPALOJEN SIMULOINTI MASIFIRE-OHJELMALLA

Simo Hostikka, Johan Mangs, Tuomas Paloposki
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
PL 1803, 02044 VTT, Espoo

Tiivistelmä

VTT:llä kehitetyllä MASIFIRE-ohjelmalla voidaan simuloida metsäpalojen leviämistä digitaalisten karttojen avulla. Ohjelman avulla voidaan simuloida sekä pinta- että latvapalojen etenemistä erilaisissa maastoissa. Ympäristön olosuhteet kuten tuuli, kosteus ja pinnanmuodot otetaan huomioon. Lisäksi ohjelma pyrkii ennustamaan palon leviämisen rakennuksiin. Mallin tuloksia ovat mm. palon leviämialue, paloteho, myrkyllisten aineiden tuotto sekä mahdollinen evakuoitava alue. Palon leviämisen laskentaan käytetty algoritmi perustuu amerikkalaiseen BEHAVE-malliin..

JOHDANTO

Metsäpalot voivat aiheuttaa merkittävän riskin rakennuksille, jotka sijaitsevat tiheän ja palamiskelpoisen kasvillisuuden läheisyydessä. Riski on erityisen merkittävä, jos rakennuksissa säilytetään esim. räjähteitä, sillä metsäpalon ja räjähdysonnettomuuden yhdistelmä voi johtaa äärimmäisen nopeaan palon leviämiseen ja katastrofitilanteeseen, jos lähistöllä on asutusta tai teollisuutta. Tällaisessa ympäristössä tapahtuvan metsäpalon matemaattisella mallintamisella voidaan tunnistaa riskit ja tutkia mahdollisuuksia niiden pienentämiseen.

Äskettäin julkaistun, metsäpalomallien kehitystä ja ominaisuuksia esittelevän yhteenveto-artikkelin [1] mukaan tämän hetken suosituin metsäpalojen mallintamiseen käytettävä ohjelmisto on Yhdysvaltojen Maatalousministeriön alaisen Rocky Mountain Research Stationin kehittämä BEHAVE-ohjelma [2], joka perustuu Rothermelin [3] pintapalojen leviämisenopeutta ja intensiteettiä koskevaan malliin sekä kasvillisuuspolttoaineiden luokittelujärjestelmään [4]. Malli ottaa huomioon polttoaineen määrän ja tyypin, tuulen, maaston kaltevuuden ja kosteusolosuhteet kokeellisten korrelaatioiden ja yksinkertaisten fysikaalisten mallien avulla.

Eräs BEHAVEn kaltaisten, osittain empiiristen ja yksinkertaisten mallien ongelma on kyvyttömyys mallintaa palorintaman kolmiulotteista rakennetta ja kasvillisuuden epähomogeenisuutta. Näiden ongelmien välttämiseksi on alettu kehittää myös metsäpalojen simulointiin tarkoitettuja CFD-malleja, jotka perustuvat numeeriseen virtauslaskentaan. Morvan & Dupuy [5] ovat kehittäneet ja validoineet CFD-mallin Välimeren alueen metsäpalojen simulointiin. Mallin monimutkaisuudesta johtuen sovellukset ovat rajoittuneet kaksiulotteisiin tapauksiin. Siitä huolimatta mallia voidaan käyttää palon kehityksen ja ympäristöolosuhteiden välisten riippuvuuksien tutkimiseen. Myös Yhdysvaltalaisen NIST:n ja VTT:n yhdessä kehittämän FDS-ohjelman käyttöä metsäpalojen simuloinnissa on tutkittu [6].

Perinteiset metsäpalomallit eivät ole tarjonneet työkaluja metsäpalon ja rakennusten välisen vuorovaikutuksen kuvaamiseen. Joissakin erityisesti metsän ja urbaanin alueen rajapintaa

(wildland-urban interface, WUI) käsittelevissä malleissa on tutkittu rakennusmateriaalien syttymistä. Cohen & Butler [7] tutkivat puun syttymistä metsäpalossa syntyvän lämpösäteilyn vaikutuksesta mutta eivät mallintaneet metsäpalon leviämistä. FDS-mallin avulla on pyritty ymmärtämään nimenomaan rakennusten ja metsäpaloissa syntyvien virtausten [6] sekä normaalin tuulen [8] välistä vuorovaikutusta ja rakennusten ympärille syntyviä kolmiulotteisia virtauskenttiä. FDS-ohjelmassa palon leviäminen kasvillisuudessa otetaan huomioon kaksifaasiformulaation avulla. Tietokoneiden nopeasta kehityksestä huolimatta FDS-mallin käyttö metsäpalojen simulointiin on vielä melko hidasta, erityisesti mallinettavan alueen suuren koon ja rakennusten kuvaamisessa tarvittavan hyvän paikkaresoluution takia.

Tässä työssä on kehitetty simulointiohjelma, joka yhdistää BEHAVE-mallin ja rakennusten syttymisen numeerisen mallin, räjähdysten aiheuttaman palon leviämisen mallin sekä latvapalojen syttymistä ja leviämistä simuloivan mallin [9]. Ohjelmaa kutsutaan nimellä MASIFIRE, joka johtuu englanninkielisestä nimestä “Map based Simulation of Fires in Forest-Urban Environment” [10]. Ohjelma ottaa huomioon maaston kasvillisuustyypin, tuulen, kosteusolosuhteet sekä maastonmuodot. Sen tuloksia ovat graafinen esitys palon leviämisestä karttapinnalla, vapautuva paloteho, myrkyllisten aineiden tuotto ja evakuoitava alue. MASIFIRE mahdollistaa digitaalisten karttojen käytön kasvillisuustietojen ja maastonmuotojen syöttämiseen.

MALLIN KUVAUS

Pintapalon leviäminen

Palon leviämistä kuvataan BEHAVE-mallin avulla [2], jossa alunperin Rothermelin [3] esittämät, pintapalon leviämistä kuvaavat fysikaaliset ja empiiriset kaavat on yhdistetty 13 standardoituun kasvillisuuspoltoainetyyppiin [4]. Rothermel esitti, että pintapalon leviämisenopeus $R_{surface}$ (m/s) voidaan laskea kaavalla

$$R_{surface} = \frac{Q\xi(1+\phi_w+\phi_s)}{\rho_b\varepsilon Q_{ig}} \quad (1)$$

missä Q on paloteho (kW/m^2), ξ on etenemissuuntaan siirtyvän lämpövirran osuus kokonaistehosta, ϕ_w ja ϕ_s ovat tuulen ja maaston kaltevuuden vaikutusta kuvaavat kertoimet, ρ_b on kuivan materiaalin tiheys (kg/m^3), ε on lämmönsiirtoon liittyvä laaduton luku ja Q_{ig} lämpömäärä, joka tarvitaan materiaalin saattamiseen syttymislämpötilaansa (kJ/kg). Metsäpalon leviämistä laskettaessa simuloitava alue jaetaan soluihin, jotka käytännössä vastaavat karttakuvan pikseleitä. Jokaisella aika-askeleella käydään läpi kaikki palavat solut ja paikallisen leviämisenopeuden perusteella lasketaan syttymisajat naapurineliöille. Pinta- ja latvapaloille käytetään erillisiä leviämisenopeuksia.

Metsäpalon voimakkuutta karakterisoiva suure on palolinjan intensiteetti I

$$I = hwR_{surface} \quad (2)$$

missä h on polttoaineen lämpöarvo (kJ/kg) ja w on palaneen polttoaineen massa (kg/m^2). BEHAVE-malli on liitetty MASIFIRE-ohjelmaan fireLib-kirjaston avulla [11], joka on internetistä ilmaiseksi saatavissa.

Latvapalon leviäminen

Latvapalojen syntymistä ja leviämistä kuvaava malli [9] hyödyntää BEHAVEn pintapaloo koskevia korrelaatioita ja yhdistää ne latvapalon leviämisenopeuden korrelaatioon. Latvapalot jaetaan ns. passiivisiin ja aktiivisiin paloihin. *Passiivisessa latvapalossa* puiden latvusto syttyy, kun pintapalon intensiteetti kasvaa riittävän suureksi. *Aktiivisessa latvapalossa* latvapalo leviää puiden latvustossa riippumatta pintapalon ominaisuuksista. Mallin mukaan aktiivisen latvapalon leviämisenopeus on

$$R_{active} = 3.34 \cdot \frac{FME}{FME_0} \cdot (R_{10})_{40\%} \quad (3)$$

missä $(R_{10})_{40\%}$ on pintapalon leviämisenopeus (standardoitu kasvillisuuspoltoainetyyppi 10, tuulen nopeus 40 % todellisesta). FME on lehvistön kosteuden vaikutusta kuvaava kerroin, joka riippuu lehvistön kosteussisällöstä (foliar moisture content, FMC). FME_0 on 100% kosteutta vastaava kerroin. Latvapalojen oletetaan voivan syntyä, kun palolinjan intensiteetti ylittää kriittisen arvon

$$I' = \left[\frac{CBH(460 + 25.9FMC)}{100} \right]^{3/2} \quad (4)$$

missä CBH on latvuston alareunan korkeus maanpinnasta (canopy base height). Latvapalon katsotaan muuttuvan passiivisesta aktiiviseksi, kun R_{active} saavuttaa kriittisen arvon $R'_{active} = 3.0/CBD$, missä CBD on latvuston efektiivinen tiheys (canopy bulk density). Lopullinen latvapalon leviämisenopeus lasketaan kaavalla

$$R_{final} = R_{surface} + CFB(R_{active} - R_{surface}) \quad (5)$$

missä CFB on palaneen latvuston osuus latvuston kokonaismassasta (crown fraction burned). CFB lasketaan kaavalla

$$CFB = \frac{R_{surface} - R'_{initiation}}{R'_{SA} - R'_{initiation}} \quad (6)$$

missä $R'_{initiation}$ on latvapalon syntymiseen johtava pintapalon leviämisenopeus ja R'_{SA} on pintapalon leviämisenopeus rajalla $R_{active} = R'_{active}$.

Myrkyllisten tuotteiden kulkeutuminen

Sekä metsä- että rakennuspaloista syntyy tuotteita jotka voivat olla ihmisille vahingollisia. MASIFIRE-ohjelmaan on siksi toteutettu mahdollisuus laskea palotuotteiden leviämistä tuulen mukana. Malli perustuu pistelähteen ja Gaussisen dispersiomallin käyttöön [12]. Konsentraatio maantasossa lasketaan kaavalla

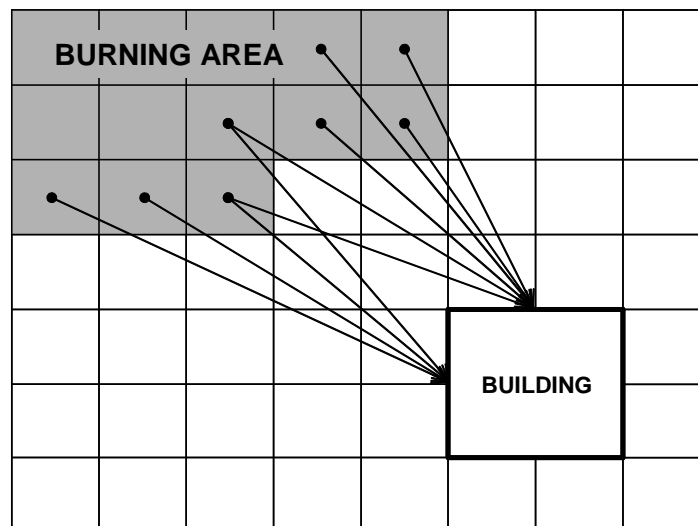
$$\chi_x(x, y) = \frac{\dot{m}_x}{\pi U_w \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp\left[-0.5\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \cdot \exp\left[-0.5\left(\frac{h(x)}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (7)$$

missä x on etäisyys tuulen suunnassa, y on etäisyys poikkisuunnassa, \dot{m}_x on palotuotteen massavirta (kg/s), U_w on tuulen nopeus (m/s). σ_y ja σ_z ovat palopatsaan leveyttä kuvaavat parametrit vaaka ja pystysuunnissa. Palopatsaan korkeus $h(x)$ lasketaan Nettervillen [13] esittämällä, tuulisen ympäristön ratkaisulla nostepatsaan yhtälöille. Ilmakehän kerrostuminen oletetaan neutraaliksi.

Yllä esitetyn kaavan avulla lasketaan kriittinen alue, jonka sisällä ylittyvät 8h and 15 min oleskelua vastaavat konsentraatorajat [14, 15]. Kriittisen alueen rajat esitetään simuloinnin aikana kartalla evakuoitavana alueena. MASIFIRE sisältää tuottoarvot ja konsentraatorajat CO₂ ja CO kaasuille sekä PM₁₀ pienhiukkasille. Ohjelman käyttäjä voi määrittellä uusia tuotteita ja niiden pitoisuusrajat.

Rakennusten syttyminen

Rakennusta lähestyessään metsäpalo kuumentaa rakennuksen seinää säteilyn ja konvektion välityksellä. Kuumentuessaan seinät voivat syttyä tai ne voivat rikkoutua, altistaen rakennuksen sisällön metsäpalon vaikutukselle. MASIFIRE-ohjelmassa metsäpalon lämpösäteily lasketaan kunkin rakennuksen neljälle sivulle erikseen. Kunkin karttasolun yläpuolelle asetetaan pistelähde, jonka teho vastaa 30 % solun palotehosta. 30 % on tyypillinen suurten liekkiä säteilyosuus. Jokaiselle seinälle lasketaan näkyvyyskerroin seinän asennon ja solun sijainnin perusteella. Kokonaissäteilylämpövirrantiheys saadaan laskemalla yhteen seinän ”näkemien” solujen osuudet. Menettelyä on havainnollistettu kuvassa 1.



Kuva 1. Metsäpalosta johtuvan lämpösäteilyn laskenta rakennuksen seiiniin.

Konvektiivisen lämpövirrantiheyden laskemiseksi on tiedettävä sekä seinän lähellä virtaavan kaasun lämpötila että virtausnopeus. Valitettavasti ei ole olemassa yksinkertaista mallia, joka antaisi nämä suuret mielivaltaisen muotoisen paloalueen alapuolella. Ongelman ratkaisemiseksi tehtiin joukko kaksikulotteisia simulointeja FDS-ohjelmalla, jossa laskettiin tuulen kallistaman palopatsaan aiheuttama konvektiolämpövirta rakennuksen seinille. Simulointeja tehtiin eri etäisyyksillä L , palon intensiteeteillä Q ja tuulennopeuksilla U_w .

Pienimmän neliösumman sovituksella saatiin seuraava lineaarinen yhteys konvektio-
lämpövirralle

$$\dot{q}_c''(U_w, L, Q) = 282.9 + 0.8948Q - 52.27L + 166.1U_w \quad (\text{W}) \quad (8)$$

Kaava pätee kun $5 < L < 20$ m, $50 < Q < 1000$ kW/m² ja $0 < U_w < 15$ m/s ja seinä on 20 °C lämpötilassa. Kuumalle seinälle tulosta korjataan vähentämällä termi $h(T_{wall} - 20)$, missä $h = 5$ W/m²K ja T_{wall} on seinän lämpötila (°C). MASIFIRE-ohjelmassa yllä olevaa korrelaatiota sovelletaan kuhunkin rakennukseen ja kaikkiin tuulen yläpuolella oleviin karttasoluihin. Eri soluista aiheutuvista konvektiovirroista valitaan suurin.

Seinien lämpötilan T_w laskemiseksi kullekin seinälle ratkaistaan yksiulotteinen lämmön-
johtumisyhtälö (x on etäisyys seinän ulkopinnasta)

$$\rho_w c_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_w \frac{\partial T_w}{\partial x} \right) ; \quad -k_w \frac{\partial T_w}{\partial x}(0, t) = q_c + q_r \quad (9)$$

missä ρ_w , c_w ja k_w ovat tiheys, ominaislämpökapasiteetti ja lämmönjohtavuus, q_c on konvektiivinen lämpövirrantiheys ja q_r on säteilylämpövirrantiheys. Yhtälö ratkaistaan numeerisesti. Seinän oletetaan syttyvän, kun se saavuttaa käyttäjän määrittelemän syttymislämpötilan.

Käyttöliittymä

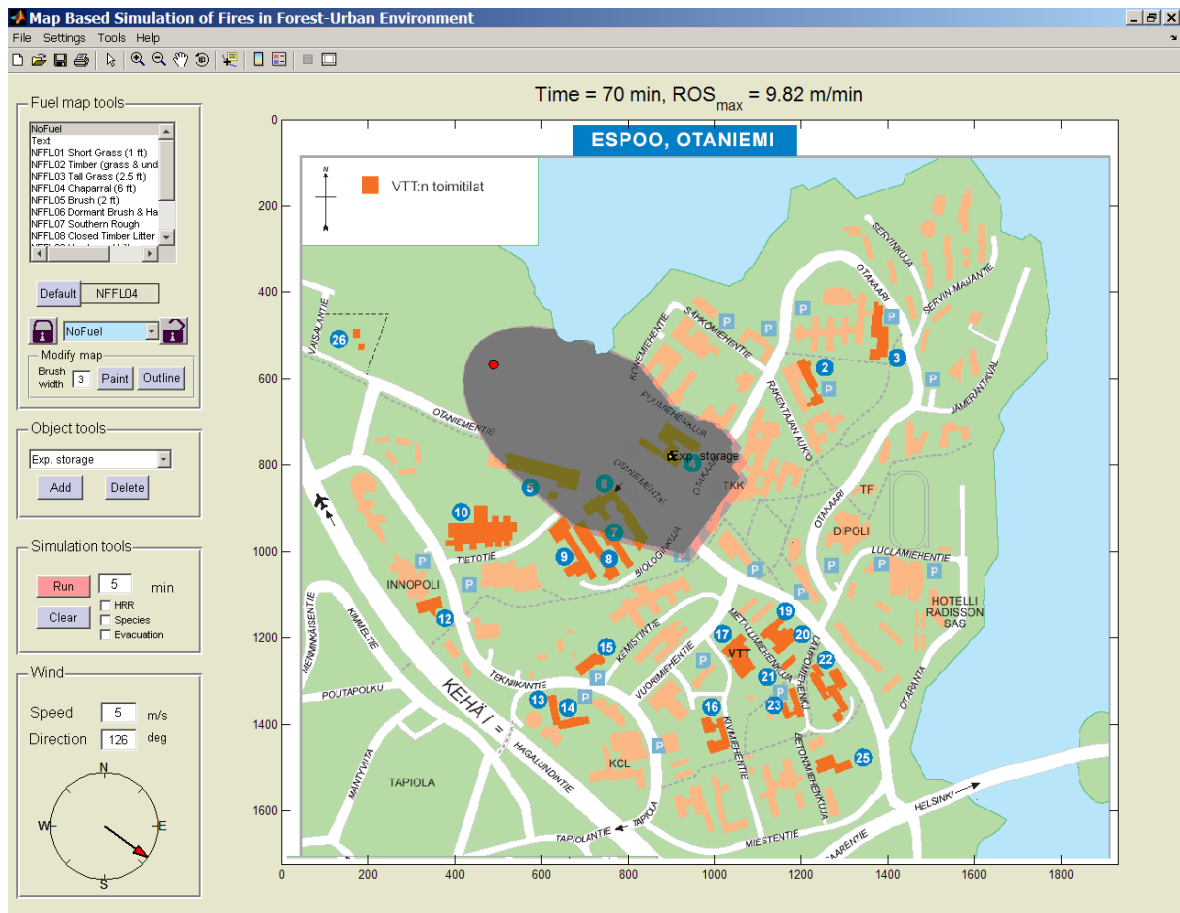
MASIFIRE-ohjelmaa käytetään graafisen käyttöliittymän avulla. Esimerkki käyttöliittymän ulkoasusta on esitetty kuvassa 2. MASIFIRE on toteutettu Matlab-ympäristössä, mutta sitä voidaan käyttää myös ilman asennettua Matlab-ohjelmaa. Tällöin tarvitaan Matlab Component Runtime (MCR) kirjasto. Ohjelman käyttöä on kuvattu käyttöoppaassa [10].

SUOMALAISEN METSÄN BIOMASSA

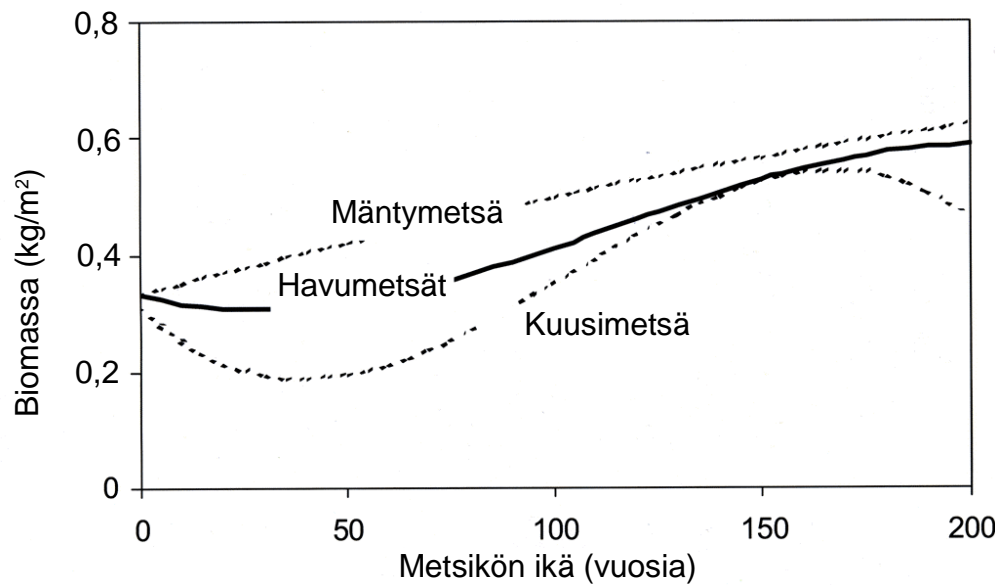
Metsäpalamallintamisen tärkeimpiä syötetietoja ovat metsän biomassa ja sen jakautuminen eri kokoluokkiin. Koska suomalaisista metsistä tällaista tietoa ei ole kootusti saatavissa, tehtiin lyhyt kirjallisuustutkimus, jonka perusteella saatiin karkeat arviot metsän pintakerroksen ja latvuston biomassalle. Pintapalon polttoaine koostuu pensaista, pienistä puista, aluskasvillisuudesta ja karikkeesta. Vanhassa pohjoissuomalaisessa kuusimetsässä tällaista biomassaa on mitattu olevan n. 1,05 kg/m² [16]. Noin 30 % (0,15 kg/m²) karikkeesta oli kooltaan suurempaa kuin 6 mm ja noin 70 % (0,34 kg/m²) pienempää kuin 6 mm. Havumetsän iän vaikutusta aluskasvillisuuden biomassaan esitetään kuvassa 3.

Latvusto koostuu neulasista, lehdistä ja oksista. Vanhan kuusimetsän latvuston biomassaksi on mitattu 2,80 kg/m² [16]. Kuvissa 4 ja 5 esitetään yhden havupuun latvuston massa puun rungon paksuuden funktiona. Kuva 4 on kuusipuulle ja kuva 5 männylle. Puustosta riippuva arvio latvuston biomassalle saadaan siis, kun mitataan puiden keskimääräinen halkaisija ihmisen rinnan korkeudella ja etsitään kuvasta yhden puun biomassa, lasketaan puiden

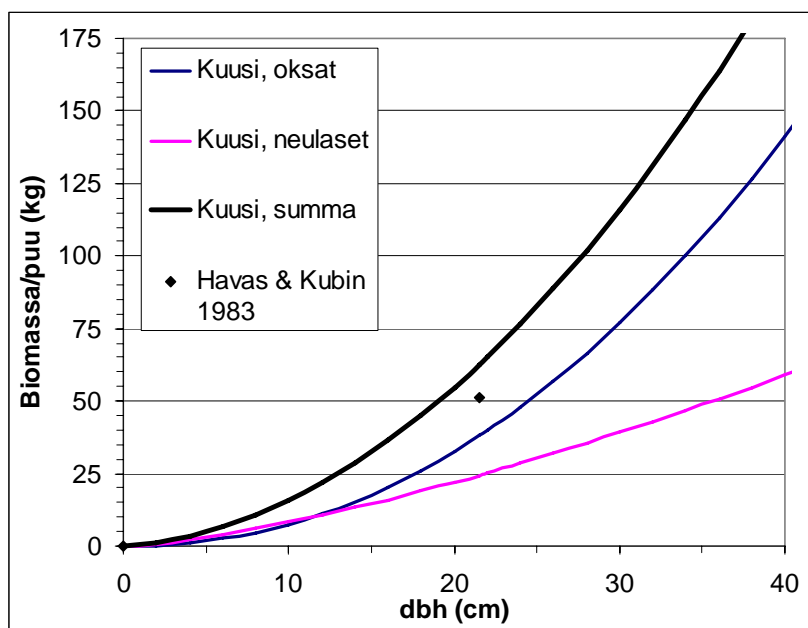
keskimääräinen lukumäärä pinta-alayksikköä kohti ja kerrotaan lukumäärä yhden puun biomassalla.



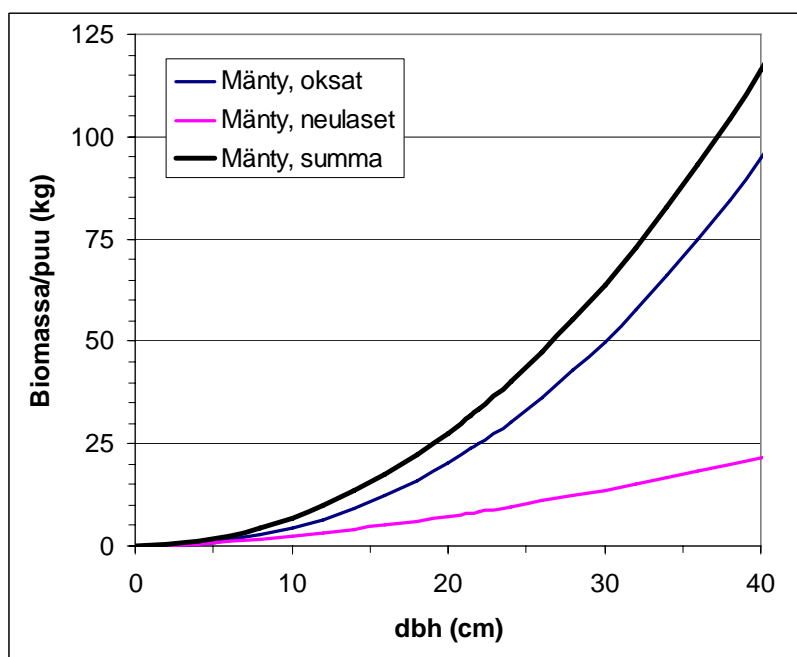
Kuva 2. MASIFIRE-käyttöliittymä.



Kuva 3. Aluskasvillisuuden biomassa havumetsän iän funktiona [17].



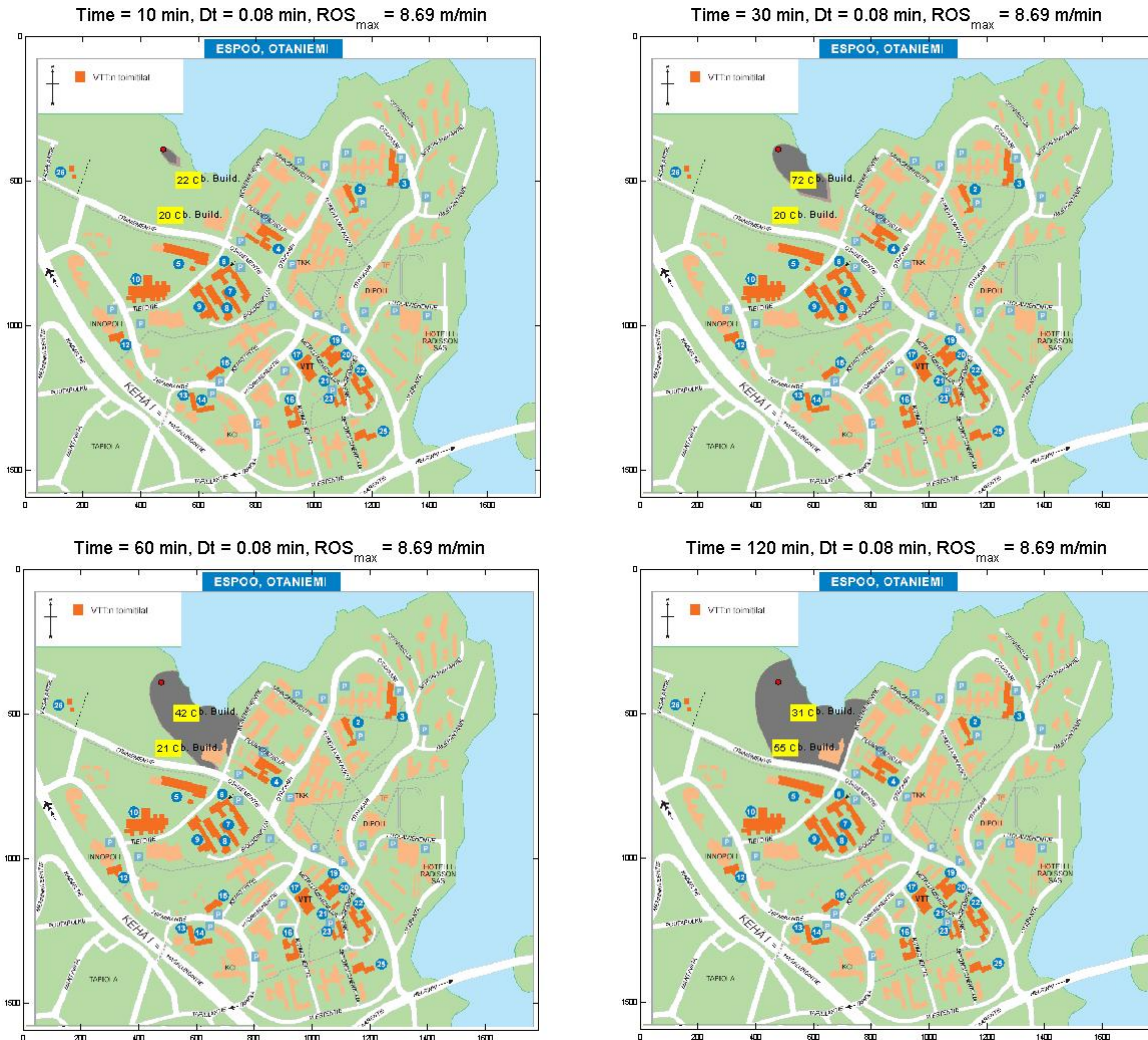
Kuva 4. Kuusipuun latvuston biomassa pohjoisessa havumetsässä puun rungon paksuuden funktiona [18].



Kuva 5. Mäntypuun latvuston biomassa pohjoisessa havumetsässä puun rungon paksuuden funktiona [18].

ESIMERKKI

Kuvassa 6 on esitetty simuloinnin eri vaiheet Otaniemen Maarissa. Maaston on oletettu olevan pitkää ruohikkoa. Simulointiin on sijoitettu kaksi rakennusta, joiden seinien lämpötilat on esitetty kuvissa.



Kuva 6. Simuloidun paloalueen eteneminen kuvitteellisessa palotilanteessa.

JOHTOPÄÄTÖKSET

MASIFIRE-ohjelmalla voidaan simuloida metsäpalojen leviämistä ja niistä aiheutuvia riskejä ihmisille ja rakennuksille hyödyntäen digitaalisia karttoja.

Ohjelman kehitystyön aikana on tullut esiin seuraavia jatkotutkimustarpeita. Kasvillisuuden kartoitus erityisesti Suomen olosuhteissa olisi tärkeää saada käyntiin. Tähän mennessä kasvillisuudesta ei ole juurikaan kerätty palosimuloinnin kannalta hyödyllisiä tietoja. Lisää informaatiota tarvitaan esim. metsän eri osien biomassasta, sen jakautumisesta eri kokoryhmiin ja kosteusolosuhteista. Lisäksi tarvitaan tietoa tuulen vaimenemiskertoimesta eri metsätyypeissä avoimen maaston tuulennopeuteen verrattuna.

Karttainformaation lukeminen ja käsittelyä tulisi kehittää, samoin kuin ajan mukana muuttuvien säätietojen käyttöä. Erilaisten paikkatietojärjestelmien hyödyntämistä voitaisiin myös tutkia. Pelastuslaitosten käyttöä varten MASIFIRE-ohjelman kehittämisessä tulisi kiinnittää huomiota reaaliaikaisen laskennan mahdollisuuteen.

KIITOKSET

Henri Biström ansaitsee kiitokset panoksestaan MASIFIRE:n maastonkorkeusmallin toteuttamisessa. Patricia Andrews, USDA Forest Service, auttoi BEHAVE-mallia koskevien yksityiskohtien kanssa ja ansaitsee kiitokset. MASIFIRE-ohjelman kehitystyön on rahoittanut Maanpuolustuksen tieteellinen neuvottelukunta MATINE.

LÄHDELUETTELO

1. Pastor, E., Zárate, L., Planas, E., Arnaldos, J. Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour. Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 29, 2003. s. 139-153.
2. Andrews, P.L. BEHAVE: Fire Behaviour Prediction and Fuel Modeling System-- BURN Subsystem Part 1. General Technical Report INT-194. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station. 1986. 130 s.
3. Rothermel, R.C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Res. Pap. INT-115. Ogden, UT; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 1972. 40 s.
4. Anderson, H.E. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. General Technical Report INT-122. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 1982. 22 s.
5. Morvan, D., Dupuy, J.L. Modeling the propagation of a wildfire through a Mediterranean shrub using a multiphase formulation. Combustion and Flame 138 (2004), s. 199-210.
6. Rehm, R., Evans, D., Mell, W., Hostikka, S., McGrattan, K., Forney, G., Bouldin, C., Baker, E. Neighbourhood-scale fire spread. 5th Symposium on Fire and Forest Meteorology, Orlando, FL, 16-20 Nov. 2003. The American Meteorological Society. 2003.
7. Cohen, J. D., Butler, B.W. Modeling Potential Structure Ignitions from Flame Radiation Exposure with Implications for Wildland/Urban Interface Fire Management. IAWF. 13th Fire and Forest Meteorology Conference. Lorne, Australia 1996. 1998. s. 81-86.
8. Rehm, R., McGrattan, K.B., Baum, H.R. Large eddy simulation of flow over a wooded building complex. Wind & Structures, Vol. 5, No. 2-4(2002), s. 291-300.
9. Scot, J.H., Reinhardt, E.D. Assessing crown fire potential by linking models of surface and crown fire behaviour. Research Paper RMRS-RP-29. Fort Collins, CO; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 2001. 59 s.

10. Hostikka, Simo; Mangs, Johan. MASIFIRE - Map based simulation of fires in forest-urban interface. Espoo, VTT. 2005. 52 s. + liitt. 2 s. VTT Working Papers 20. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2005/W20.pdf>
11. Bevins, C.D. fireLib User Manual and Technical Reference. Systems for Environmental Management. 1996. 47 s.
12. Memarzadeh, F. A Functional Explanation of a Point Source Gaussian Plume Dispersion Model. 1995 ASME Cogen-Turbo Power Conference, August 23-24, 1995, Vienna, Austria. 11 s.
13. Netterville, D.D.J. Plume Rise, Entrainment and Dispersion in Turbulent Winds. Atmospheric Environment, Vol 24A, No. 5, 1990. s. 1061-1081.
14. HTP-arvot 2002. Sosiaali- ja terveysministeriö, Työsuojeluosasto. Kemian työsuojeluneuvottelukunta. Työsuojelusäädöksiä 3. Tampere. 2002. 55 s.
15. Sandberg, D.V., Ottmar, R.D., Peterson, J.L. Core, J. Wildland fire on ecosystems: effects of fire on air. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol. 5. Ogden, UT; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 2002. 79 s.
16. Havas, P. and Kubin, E. Structure, growth and organic matter content in the vegetation cover of an old spruce forest in Northern Finland. Annales Botanici Fennici Vol. 20. 1983. s. 115-149.
17. Muukkonen, P. & Mäkipää, R. Biomass models of understorey vegetation according to stand age and site quality in boreal coniferous forests. 2003. 15 kalvoa. <http://www.metla.fi/hanke/3306/understorey-pres.pdf>
18. Muukkonen, P. Generalised allometric volume and biomass functions for some European tree species Cost e21 meeting "Task Force Meeting on biomass expansion factors (BEFs) and allometric biomass equations". 2004. Hauho 16-19.5.2004. 11 kalvoa. <http://www.metla.fi/hanke/3306/index-en.htm>