

Ján GLASA¹, Peter WEISENPACHER², Ladislav HALADA³

ANALÝZA PRIEBEHU LESNÉHO POŽIARU POMOCOU POČÍTAČOVEJ SIMULÁCIE

ANALYSIS OF FOREST FIRE BEHAVIOUR BY COMPUTER SIMULATION

Abstrakt

Práca stručne zhŕňa existujúce metódy modelovania šírenia sa lesných požiarov a programové systémy, ktoré sú založené na týchto modeloch. Ich možná aplikácia na simuláciu lesných požiarov na území Slovenska je ilustrovaná na rekonštrukcii konkrétneho ničivého lesného požiaru, ktorý vypukol v októbri roku 2000 a spôsobil smrť šiestich osôb. Na rekonštrukciu požiaru bol použitý programový systém FARSITE adaptovaný na špecifické podmienky Slovenska, ktorý umožnil analyzovať správanie sa požiaru v tomto regióne.

Abstract

In this paper existing methods of forest fire modelling and program systems based on these models are briefly summarized. Their possible utilization for the forest fire simulation in Slovakia is demonstrated by computer reconstruction of a tragic destructive forest fire in the locality Kromplá in Slovak Paradise National Park. This fire caused the death of six people in October 2000. The program system FARSITE adapted for specific conditions in Slovak forests was used to analyse fire behaviour in the region.

Keywords: forest fire modelling and simulation, forest fire behaviour, FARSITE, decision support, forest fire management

Úvod

Lesné požiare patria k najničivejším prírodným fenoménom, ktoré ohrozujú nielen majetok, prírodu a životné prostredie, ale aj ľudské životy. Každoročne spôsobujú obrovské škody na drevnej hmote a vegetácii a silne devastujú prirodzený ráz krajiny, existujúce ekosystémy a životné prostredie územia zasiahnutého požiarom. Podľa štatistík o lesných požiaroch v desaťročnom období na prelome milénia (r. 1994-2005) bolo na Slovensku 43 obetí požiaru, z toho 35 zranených a 8 usmrtených osôb [31]. Počas lesného požiaru v lokalite Kromplá v Národnom parku Slovenský raj v roku 2000 prišlo o život 6 osôb. Tento požiar zničil okolo 80 ha lesa včítane časti cenných pôvodných porastov v Národnej prírodnej rezervácii Tri kopce. Počas tohto požiaru sa objavili rôzne názory na taktiku a možné spôsoby boja s požiarom dostupnými pozemnými prostriedkami v podmienkach vysokého stupňa ochrany prírody. Zároveň sa ukázala dôležitosť rýchlych a efektívnych prostriedkov na hasenie požiaru v ťažkom, nedostupnom teréne. Žiaľ, v tom čase na Slovensku nebol k dispozícii žiaden programový systém na počítačovú simuláciu šírenia sa požiaru, ktorý by

¹ RNDr., CSc., Slovenská akadémia vied, Ústav informatiky, Dúbravská 9, 845 07 Bratislava, e-mail: Jan.Glasa@savba.sk

² Mgr., PhD., Slovenská akadémia vied, Ústav informatiky, Dúbravská 9, 845 07 Bratislava, e-mail: upsyweis@savba.sk

³ doc. RNDr., CSc., Slovenská akadémia vied, Ústav informatiky, Dúbravská 9, 845 07 Bratislava, e-mail: upsyhala@savba.sk

bol použiteľný na podporu strategických rozhodnutí protipožiarneho manažmentu. Jednou z možností, ako zlepšiť efektívnosť zásahu a zvýšiť bezpečnosť zasahujúcich požiarnikov a záchranárov je predpovedať správanie sa požiaru v danej topografii pomocou počítačových simulátorov požiarov. Toto tvorilo jadro našej motivácie, výsledkom čoho bolo vytvorenie národného konzorcia 4 inštitúcií na výskum počítačovo-riadenej simulácie šírenia sa lesného požiaru a jej možného použitia na podporu rozhodovania v podmienkach Slovenska. Spomedzi dostupných simulačných systémov sme pre uvedené účely vybrali programový systém FARSITE (Fire Area Simulator), ktorý bol pôvodne vyvinutý pre potreby simulácie lesných požiarov v podmienkach amerických národných parkov a iba nedávno bol úspešne testovaný v podmienkach západnej a južnej Európy [16, 17, 3].

Rýchly rozvoj počítačov a informačných technológií podnietil vývoj veľmi výkonných počítačových systémov schopných simulovať šírenie lesných požiarov a popisovať ich postup v priestore a čase. Takéto systémy sú tiež schopné kvantifikovať a často aj vizualizovať rozličné parametre požiaru (napríklad rýchlosť šírenia, výšku plameňa, a pod.), ktoré sú potrebné na klasifikáciu typu požiaru a na odhad rizík a škôd zapríčinených požiarom. Môžu byť použité buď priamo na konkrétne potreby protipožiarneho manažmentu, alebo môžu byť tiež včlenené do komplexnejších systémov na podporu rozhodovania (decision support systems) [2]. Praktické používanie takýchto systémov v EÚ je však v súčasnosti ešte veľmi zriedkavé [41]. Systémy na predpovedanie správania sa požiaru je možné v konkrétnej oblasti použiť na protipožiarnu prevenciu a na plánovanie. Umožňujú simulovať reakciu protipožiarneho manažmentu a testovať efektívnosť stratégie a taktiky v rôznych podmienkach s ohľadom na špecifickú regionálnu infraštruktúru, podmienky, prostriedky a zdroje. Takéto systémy je možné použiť tiež na rekonštrukciu požiarov počas post-zásahového obdobia alebo mimo hlavnej požiarnej sezóny, aby bolo možné lepšie pochopiť priebeh daného konkrétneho požiaru a okolnosti, ktoré viedli k tragickým mimoriadnym udalostiam a/alebo k mimoriadnym stratám na hodnotách a majetku [15, 34, 36, 37]. Systémy založené na predikcii šírenia sa požiaru sa napokon môžu použiť na operačné potreby manažmentu počas aktívnych, prebiehajúcich lesných požiarov a pri cvičení, príprave a výchove príslušníkov zasahujúcich zložiek. V súčasnosti existuje viacero sofistikovaných programových systémov, ktoré sú schopné simulovať reálne (alebo potenciálne) rozsiahle lesné požiare pri reálnych (alebo možných) meteorologických, palivových a topografických podmienkach, pričom rozsah simulovaných požiarov sa meria až na desiatky hektárov zasiahnutej plochy a na hodiny alebo dni trvania daného požiaru. Napriek rozsahu a komplexnosti simulovaného javu sú niektoré systémy určené pre bežne dostupné počítačové prostriedky (osobné počítače) a uskutočňujú dostatočne rýchle výpočty na to, aby boli použiteľné dokonca na operačné účely (napr. systémy BEHAVE a FARSITE).

Pri modelovaní lesných požiarov sa v súčasnosti používajú dva dominantné princípy, ktoré sú založené na sofistikovaných laboratórnych experimentoch a experimentoch s riadeným lesným požiarom a na starostlivej validácii a verifikácii jednotlivých modelov. Prvý princíp reprezentujú tzv. semi-empirické modely založené zvyčajne na Rothermelovej formulácii šírenia požiaru v stabilnej fáze, v ktorej parametre čelnej línie požiaru (rýchlosť šírenia, výška plameňa, intenzita požiaru) závisia na daných podmienkach prostredia, ako sú parametre paliva a jeho vlhkosť, rýchlosť a smer vetra, topografický sklon a pod. Jako simulačná technika na popis postupu línie požiaru v priestore a čase sa v systémoch tohto typu používajú vlnový (Huygensov princíp) alebo celulárny prístup. Známymi simulačnými systémami tohto typu sú napríklad systémy FARSITE [8], WILDFIRE [39], FIRESTATION [20] a FIREMAP [4]. Jednotka priestorového rozlíšenia v takýchto systémoch je zvyčajne 10 m a viac, preto nie je možné uvažovať heterogenitu na menších plochách a parametre odpovedajúce konkrétnej plošnej jednotke sa špecifikujú ako

spriemernené hodnoty. Na druhej strane, semi-empirické systémy nie sú silne limitované vzhľadom na simulovaný priestor a ich výpočtový čas sa meria v sekundách.

Druhý princíp modelovania lesných požiarov reprezentujú fyzikálne modely. Proces horenia je v nich popísaný pomocou zákonov zachovania hmotnosti, zložky, momentu a energie, využívajúc poznatky z teórie dynamiky tekutín (computer fluid dynamics). Fyzikálne modely uvažujú jeden alebo viac procesov prenosu energie z horiacej zóny do nehoriaceho paliva a vo všeobecnosti vedú na systémy viacerých diferenciálnych rovníc, ktoré vyžadujú výpočtovo náročné numerické výpočty a obvykle aj veľmi výkonné výpočtové prostriedky [27]. Takéto systémy rešpektujú heterogenitu paliva na veľmi malých plochách. Nevýhodou však je, že hoci priestorové rozlíšenie je možné udať v centimetroch, výsledné rozlíšenie je silne limitované simulovaným priestorom, v ktorom je simulovaný proces modelovaný, keďže simulácia sa uskutočňuje v 3D priestore. Výpočet je preto obmedzený na relatívne malé priestory, pričom výpočtový čas sa meria v hodinách. Efektívna paralelná realizácia takýchto výpočtov je výzvou pre súčasný výskum. Do tejto kategórie systémov patria napríklad systémy WFDS [24, 25, 40], FIRETEC [19], FIRESTAR [5] a CAFME [26].

Oba spomínané modelovacie prístupy majú svoje výhody i ohraničenia oblasti použitia. Zlepšenie kvality výstupov simulácie založenej na modeloch prvého typu je možné dosiahnuť napríklad začlenením modelu vplyvu vetra na šírenie požiaru v premenlivej topografii a modelu vplyvu tangenciálnych síl na líniu požiaru, pričom druhý problém ešte nebol vyriešený, hoci experimenty potvrdili, že vplyv tangenciálnych síl nie je zanedbateľný [33, 35, 38, 28]. Ďalším zaujímavým problémom je uvažovať namiesto lokálneho eliptického šírenia požiaru z bodového zdroja aj iné tvary pozorované počas experimentov. Na základe našich viacročných skúseností z výskumu problémov týkajúcich sa šírenia požiaru a jeho modelovania považujeme oba spomenuté prístupy za užitočné. Umožňujú odhaliť tiež prípadné neočakávané zmeny v tendenciách správania sa požiaru, ktoré by mohli viesť k tragickým dôsledkom.

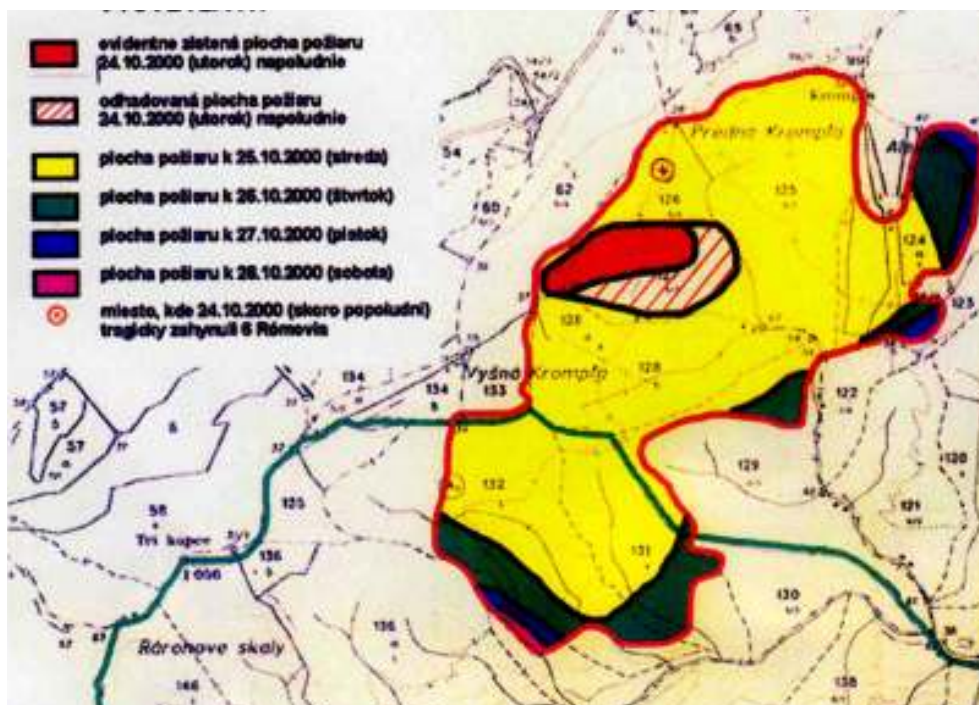
Systém FARSITE [8] patrí k semi-empirickým simulátorom lesných požiarov. Používa sa (zvlášť v USA) na plánovacie aj operačné účely. FARSITE využíva prednosti GIS systémov. Sú v ňom implementované viaceré modely správania sa požiaru, ako sú napríklad model povrchového požiaru, korunového požiaru, model akcelerácie požiaru spôsobenej bodovými zdrojmi požiaru, model prepočtu vlhkosti paliva, model vplyvu hasenia, a pod. Pôvodne bol vyvinutý v United States Department of Agriculture (USA) a bol zvlášť určený na použitie v amerických národných parkoch v čase špičkovej požiarnej sezóny. V európskych podmienkach bol testovaný iba nedávno v Nemecku, Švajčiarsku, Taliansku a Španielsku. V našich doterajších prácach [14, 9-11] sme analyzovali matematické základy metód implementovaných v systéme FARSITE s cieľom adaptovať systém na vykonávanie simulácií lesných požiarov na Slovensku a získať schopnosť ho správne používať v špecifických podmienkach. Táto analýza nám umožnila lepšie pochopiť modely včlenené v systéme a ich ohraničenia, ktoré môžu ovplyvniť výsledky simulácie.

V tejto práci sa zameriame na ilustráciu možností použitia systému FARSITE pri odhaľovaní nebezpečných tendencií správania sa požiaru v konkrétnych podmienkach. Ako príklad použijeme rekonštrukciu jedného z najtragickejších ničivých požiarov za posledných 10 rokov, lesného požiaru v Národnom parku Slovenský raj v r. 2000. V podmienkach Slovenského raja však vystupuje niekoľko faktorov, ktoré komplikujú nasadenie systému FARSITE. V prvom rade ide o mimoriadne členitú topografiu s veľkým prevýšením, často nedostupnú pre automobilovú požiaru techniku, a o vysokú variabilitu vegetačného pokryvu v danej lokalite. Toto spôsobuje, že niektoré javy je možné na danom stupni priestorového rozlíšenia simulovať len do určitej miery. Navyac, štandardná sada palivových modelov (NFFL fuel models [1]) používaná FARSITE-om nebola pôvodne navrhnutá pre podmienky

v strednej Európe. Preto bolo nevyhnutné pre záujmové územie definovať nové palivové modely. Získať presný odhad parametrov palivových modelov nebola triviálna úloha v oblastiach s významne vysokou diverzitou vegetácie spôsobenou veľkými rozdielmi v prevýšení terénu a chráneným charakterom územia Kromple v Slovenskom raji (toto tiež platí pre významnú časť územia Slovenska). Výsledky simulácie odhalia základné tendencie šírenia sa požiaru v danom regióne a narastajúce riziko v špecifických podmienkach a okolnostiach požiaru. Použitím počítačovej simulácie sa pokúsime prispieť k diskusii o správaní sa simulovaného požiaru v prvých fázach jeho rozvoja a o okolnostiach, ktoré viedli k tragickej udalosti. Pokúsime sa nájsť odpoveď na otázku *prečo malo požiarovisko v prvých fázach požiaru výrazne pretiahnutý oválny tvar a prečo bola skupina šiestich osôb obkľúčená požiarom*. Niektoré predbežné výsledky týkajúce sa rekonštrukcie tohto požiaru už boli čiastočne prezentované [15], súborné výsledky samotnej rekonštrukcie budú publikované v inej práci.

Počítačová simulácia lesného požiaru v Národnom parku Slovenský raj

Cieľom tejto časti je poukázať na možnosti počítačovej simulácie v prípade požiaru, ktorý patril k najdeštruktívnejším požiarom v regióne vzhľadom na svoj rozsah a spôsobené škody.



Obr. 1: Výrez z mapy z dokumentácie požiaru so zakreslenými požiaroviskami

Základné údaje o požiare je možné nájsť v dokumentácii požiaru [18]. Požiar oznámil vo večerných hodinách 23.10.2000 miestny obyvateľ, ktorý ohlásil dym spôsobený požiarom na hrebeni Kromple. V dopoludňajších hodinách 24.10. bol požiar potvrdený v blízkosti hrebeňa Kromple. Požiarovisko bolo napoludnie odhadnuté na 3-6 ha a zaznamenané počas prvej obhliadky požiaru (viď. Obr. 1). Výrazne predĺžený oválny tvar požiaroviska bol orientovaný na východ. V dopoludňajších hodinách prebiehali protipožiarne práce hlavne na hrebeni a po spádnici na okrajoch požiaroviska. V dokumentácii požiaru sa spomínajú

ťažkosti spôsobené ťažkým terénom, vysokým sklonom svahu a hustou vegetáciou. Pre nedostupnosť terénu nebolo možné na hasenie použiť automobilovú techniku, použili sa jednoduché prostriedky a budovanie protipožiarnych pásov. V skorých popoludňajších hodinách 24.10. nastala náhla zmena počasia, začal silný juhovýchodný vietor, ktorý spôsobil rýchlo sa šíriace lokálne korunové požiare. Toto spôsobilo náhlu zmenu v správaní sa požiaru, ktorá viedla k tragickej udalosti (nahlásená krátko po 14. hodine), keď zahynula skupina 6 osôb obklúčených požiarom. Následne boli zastavené prakticky všetky protipožiarné práce a požiar sa šíril bez obmedzenia. Nasledujúci deň, 25.10., sa požiar šíril hlavne severovýchodným, južným a juhozápadným smerom (Obr. 1). Počas tohto dňa boli nasadené do boja s požiarom značné prostriedky a požiarnici dostali požiar pod kontrolu. V ďalších dňoch sa už požiar mimo dosiahnutého požiaroviska takmer nešíril (Obr. 1), preto sme sa pri jeho rekonštrukcii zamerali na prvé dva dni jeho šírenia.

Reálne údaje, ktoré popisujú topografiu (nadmorská výška, sklon a osvit terénu) a vegetáciu (korunové pokrytie) v GIS formáte s priestorovým rozlíšením 10 m, a parametre palivového modelu boli pre účely simulácie pripravené výskumníkmi z TU vo Zvolene (Slovensko). Na základe terénnych meraní a ich laboratórnom vyhodnotení bol pre záujmové územie definovaný originálny palivový model TER (vid'. Tab. 1) [21, 32].

Tab. 1: Parametre palivového modelu pre lokalitu Krompla potrebné pre FARSITE

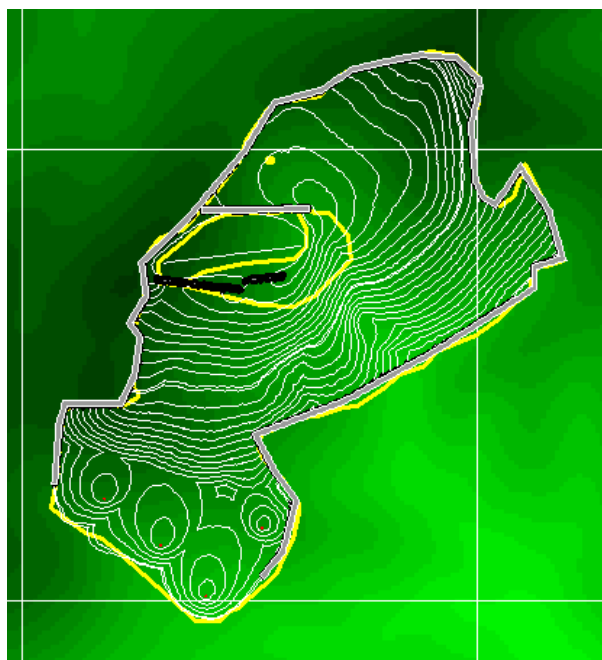
Fuel Model	Fuel load [t/ha]					SAV ratio [l/cm]			Fuel bed depth [m]	Dead fuel extinction moisture [%]	Heat content [kJ/kg]
	Dead 1hr	Dead 10hr	Dead 100hr	Live herb	Live Woody	Dead 1hr	Live Herb	Live woody			
TER	5,842	3,499	0,339	0,473	1,570	77,80	49,20	49,20	0,32	27	18600

Meteorologické údaje boli spracované podľa údajov poskytnutých z meteorologických staníc v Poprade, Telgárte a v Košiciach [30]. Pre pomerne veľkú vzdialenosť medzi stanicami a topografickú členitosť lokality boli tieto dáta upravené s ohľadom na pozorovania zaznamenané v dokumentácii požiaru. Vzhľadom na špecifické podmienky jesenného obdobia s nízkymi nočnými a dennými teplotami (-6°C o 5. hod. 25.10. a 5°C o 5. hod. 26.10.) bol použitý scenár s vyššou vlhkosťou paliva (hodnoty 10-12 % pre odumreté palivo a 170 % pre živé palivo). Obdobie horenia (burn period) bolo nastavené na 9-21 a 8-21 hod. pre dni 24. a 25.10. Koefficient redukcie rýchlosti šírenia (adjustment factor) bol s ohľadom na sezónne meteorologické podmienky a podnebie daného regiónu nastavený na hodnotu 0.4 na základe vykonania viacerých komparatívnych simulácií so systémom FARSITE. Keďže parametre korún stromov neboli pre dané územie známe, nesimulovali sme pri rekonštrukcii požiaru lokálny korunový požiar. Kvôli simulácii vplyvu silného nárazového vetra v poobedňajších hodinách 25.10., ktorý zapríčinil sekundárne požiare spôsobené úlomkami stromov zgúľanými dolu strmým svahom, sme v simulácii použili na príslušných miestach niekoľko sekundárnych bodových zdrojov požiaru.

Prvé dva dni šírenia požiaru

Pri prvých simuláciách sme vychádzali z vtedy všeobecne prijímaného predpokladu, že požiar vznikol z bodového zdroja na lesnom chodníku pod hlavným hrebeňom Kromple. Výsledky simulácie však ukázali, že po prvých troch hodinách horenia požiaroviská nedosahovali tvar zaznamenaný v dokumentácii požiaru. Napriek tomu, že bod vzniku požiaru bol experimentálne posúvaný do rôznych miest, nedosiahli sa uspokojivé výsledky.

Takýmto postupom sme však získali hlbšiu skúsenosť a chápanie základných tendencií šírenia sa požiaru v regióne a nadobudli sme presvedčenie, že požiar mohol vzniknúť vzbĺknutím zápalnej línie v tvare úsečky alebo lomenej čiary, alebo súčasným zapálením v niekoľkých bodoch orientovaných z hrebeňa dolu svahom (viď. Obr. 2). Keď sme použili takýto spôsob vznietenia požiaru, výsledky simulácie relatívne dobre odpovedali reálnemu stavu požiaru zaznamenanému v dokumentácii (por. Obr. 1). V tejto simulácii sme zároveň uplatnili protipožiarne práce dobrovoľníkov a lesných pracovníkov na okrajoch požiaroviska po spádnicí a na hrebeni v súlade s dokumentáciou požiaru.



Čas [hod]	Rýchlosť šírenia [m/min]	Výška plameňa [m]
10	0.6	0.7
11	0.1	0.3
12	0.3	0.5
13	0.3	0.5
14	0.4	0.5
15	1.7	1.0

Obr. 2: Výsledky simulácie prvých dvoch dní požiaru (2D výstup z FARSITE) a parametre požiaru na línii požiaru blížiaceho sa k miestu tragickej udalosti

Tragická udalosť, ktorá sa stala v čase okolo 14. hod., bola spôsobená náhlou zmenou rýchlosti vetra, ktorá rozšírila požiar do korún stromov. Korunový požiar pravdepodobne prekvapil skupinu osôb, ktorá sa zdržiavala v ohrozenom priestore. Skupina bola obkľúčená požiarom a nestihla včas uniknúť, pretože v danom priestore bol strmý terén a hustá vegetácia. Šírenie požiaru ako aj zmena jeho orientácie vyvolaná vetrom a topografiou terénu je dobre viditeľné na Obr. 2. Miesto, na ktorom došlo k tragédii, je označené na Obr. 2 malým jasným krúžkom (por. tiež Obr. 1). Simulácia relatívne dobre signalizuje túto tendenciu šírenia sa požiaru dokonca aj bez použitia výpočtového modulu pre korunový požiar (neboli známe vstupy pre tento modul, ako bolo už spomenuté vyššie). Rýchlosť šírenia línie požiaru a jej zmeny ako aj výšku plameňa na línii požiaru v kritickom čase je možné získať z parametrov poskytovaných systémom FARSITE (viď. Obr. 2).

Tab. 2: Vyhodnotenie požiaru: čas [mesiac, deň, hodina], obvod [km] a plocha [ha] požiaroviska.

<i>Simulovaný čas</i>	<i>Obvod požiaroviska</i>	<i>Plocha požiaroviska</i>
10 24 9:00	0.71	0.00
10 24 10:00	0.94	4.11
10 24 11:00	1.32	5.44
10 24 12:00	1.73	6.44
10 24 13:00	2.24	8.22
10 24 14:00	2.72	11.59
10 24 15:00	3.24	16.51
10 24 18:00	3.87	26.74
10 24 21:00	4.27	34.09
10 25 21:00	6.31	69.99

Údaje v Tab. 2 ilustrujú postupný nárast obvodu a plochy požiaroviska v kritickom období. Po tragickej udalosti boli zastavené protipožiarne práce a stiahnutí všetci dobrovoľníci z oblasti. Požiar sa preto šírila nerušené ďalej. Skutočné požiarovisko nebolo ku koncu dňa zistené, preto nie je možné simuláciu porovnať so skutočným stavom požiaru večer 24.10.

Požiar postupoval 25.10. prevažne v južnom, severovýchodnom a východnom smere. Do hasebných prác bolo zapojených 219 osôb, 1 vrtulník a 2 lietadlá typu Turbočmeliak. Po vyhodnotení vzdušného zásahu boli lietadlá nasadené na hrebeni a západnej časti požiaroviska. Približne o 13:30 sa opäť zmenila poveternostná situácia. Silný vietor s nárazmi až 53 km/h zapríčinil nekontrolovateľné šírenie požiaru a hasenie komplikovalo silné zadymenie. Práce boli prerušené o 17:30. Postup línie požiaru počas tohto dňa je možné opäť vidieť na Obr. 2. Kým šírenie na východnej hranici požiaroviska bolo úspešne zastavené, na západnej a juhozápadnej strane sa požiar ďalej šírila. Počítačová simulácia nedosiahla večer okraj požiaroviska zaznačený v dokumentácii. Táto odchýlka mohla byť spôsobená možnými sekundárnymi požiarimi vzniknutými pod hlavnou líniou požiaru, ktoré mohli prispieť k rýchlejšiemu postupu požiaru dolu svahom (v dokumentácii sa spomínajú uvoľnené horiace úlomky padajúce dolu strmým svahom). Počas tretieho dňa, 26.10., zasahovali už 4 vrtulníky a kulminovali tiež pozemné protipožiarne aktivity. Požiar bol lokalizovaný a ani v ďalších dňoch sa už prakticky nešíril.

Záver

Výsledky počítačovej simulácie nám umožnili nájsť odpoveď na obe otázky položené v úvode. Poznatky získané rekonštrukciou požiaru sme konzultovali s vedúcimi pracovníkmi HaZZ v Spišskej Novej Vsi, ktorí nám potvrdili, že ďalšie vyšetrowanie príčin požiaru ukázalo, že spomínaný požiar sa mohol v ranných hodinách 24.10.2000 rozhorieť z väčšej plochy, keďže bolo potvrdené, že latentné horenie prebiehalo v danej oblasti už počas predchádzajúceho dňa. Toto podporuje náš predpoklad, že požiar nemohol vzniknúť 24.10. z jedného zápalného bodu. Hoci sme predtým nemali túto informáciu, počítačová simulácia nás priviedla k tomuto predpokladu. Výsledky simulácie tiež potvrdili, že skupina osôb, ktorá tragicky uhorela počas prvého dňa požiaru, mohla byť obkľúčená požiarom v čase odpovedajúcom času tragickej udalosti. Bolo to spôsobené náhlou zmenou meteorologických podmienok a topografiou terénu. Domnievame sa, že použitie počítačovej simulácie môže

odhaliť zvyšujúce sa riziko správania sa požiaru v danom teréne a môže takto pomôcť predchádzať takýmto tragickým udalostiam. Navyiac, dôkladná znalosť simulačného systému umožňuje pre daný región vytvoriť tabuľky parametrov charakterizujúcich správanie sa požiaru v regióne s definovaným palivovým typom pre rôzne poveternostné podmienky (viď Tab. 3) a generovať v predstihu možný vývoj požiaru a analyzovať ho v záujme odhalenia špecifického správania sa požiaru v regióne. Z predpokladanej rýchlosti šírenia požiaru si je možné pre danú situáciu urobiť predbežný obraz o požiarnej situácii a získať prvý odhad tvaru požiaroviska. Avšak, časový priebeh požiaru a tvar a rozsah požiaroviska sa najlepšie vizualizuje vykonaním kompletnej počítačovej simulácie, ktorá tiež umožňuje predpovedať obvod, tvar a plochu horiaceho územia a v závislosti na jeho prístupnosti navrhnúť najefektívnejšie alternatívy pozemných a/alebo vzdušných hasiacich prác a ich personálne a materiálne zabezpečenie. V budúcnosti plánujeme využiť pri špecifikovaní palivových modelov multi-spektrálnu analýzu a vyvinúť nové palivové modely pre počítačovú simuláciu a podporu rozhodovania v podmienkach Slovenska. Experimentálne výsledky so zodpovedajúcou metodológiou [15, 13, 11] sú pre nás výzvou na rozpracovanie zlepšenej formulácie postupu línie požiaru s tangenciálnymi silami aktivované konvektívnymi tokmi pozdĺž línie požiaru. Tiež sa zaujímate o výskum v oblasti 3D animovanej vizualizácie šírenia požiaru v reálnom (alebo virtuálnom) lese [12, 29, 7] ako aj o simulačné systémy a techniky založené na fyzikálnych modeloch [22, 23, 40, 6].

Tab. 3: Rýchlosť šírenia požiaru v závislosti na rýchlosti vetra a sklone svahu pre palivový model TER. Hodnoty sú určené v intervalovej forme, keďže vplyv vetra je silne závislý na parametroch koruny stromov (canopy cover)

Rýchlosť vetra nad vegetáciou [km/h]	Rýchlosť šírenia požiaru [m/min]	Rýchlosť šírenia požiaru [m/min]	Rýchlosť šírenia požiaru [m/min]	Rýchlosť šírenia požiaru [m/min]
0	0.16	0.20	0.32	0.48
5	0.20 - 0.24	0.24 - 0.28	0.32 - 0.40	0.52 - 0.56
10	0.24 - 0.40	0.28 - 0.44	0.40 - 0.56	0.56 - 0.72
15	0.32 - 0.60	0.36 - 0.64	0.44 - 0.76	0.64 - 0.92
20	0.40 - 0.88	0.44 - 0.92	0.56 - 1.00	0.72 - 1.20
30	0.60 - 1.52	0.64 - 1.56	0.76 - 1.64	0.92 - 1.84
Sklon [%]	0 %	10 %	20 %	30 %

Pod'akovanie

Táto práca vznikla s podporou slovenských výskumných grantových agentúr APVV a VEGA v rámci projektov APVT-51-037902, APVV-0532-07 a VEGA 2/7097/27.

Zoznam literatúry

- [1] Anderson, H. E. Aids to determining fuel models for estimating fire behaviour. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT-122, 1982

- [2] Andrew, P. L. A temporal and spatial framework for development and application of wildland fire decision support systems, *Proceedings of the International Conference on Forest Fire Research*, Figueira da Foz, 2006
- [3] Arca, B., Duce, P., Pellizzaro, G.; Laconi, M.; Salis, M.; Spano, D. Evaluation of FARSITE simulator in Mediterranean shrubland. *Forest Ecology and Management*, 234S, S110, 2006
- [4] Ball, G. L.; Guertin, D. P. Firemap, fire and environment: ecological and cultural perspectives, NC: USDA Forest Service, 215-218, 1991
- [5] Clark, T. L.; Jenkins, M. A.; Coen, J. L.; Packham, D. R. A coupled atmospheric-fire model: convective Froude number and dynamic fingering, *International Journal of Wildland Fires*, 6, 177-190, 1996
- [6] Ewans, D. D.; Rehm, R., Baker, E. Physics-based modeling of community fires, *Proceedings of the 10th International Interflam Conference*, Vol. 2, 1065-1076, 2004
- [7] Fabrika, M.; Dursky, J. Tree growth simulator. Ecological and Forestry Research Agency, 2005
- [8] Finney, M. A. FARSITE: fire area simulator - model, development and evaluation, Research Paper RMRS-RP-4, USDA Forest Service, 1998
- [9] Glasa, J.; Halada, L. Application of envelope theory for 2D fire front evolution, *Proc. of the Int. Conference on Forest Fire Research*, Figueira da Foz, Portugal, 2006
- [10] Glasa, J.; Halada, L. Envelope theory and its application for a forest fire front evolution, *Journal of Applied Math., Statistics and Informatics*, 3, 1, 27-37, 2007
- [11] Glasa, J.; Halada, L. On elliptical model for forest fire modeling and simulation, *Mathematics and Computers in Simulation*, 78, 76-88, 2008
- [12] Glasa, J.; Pajorová, E.; Halada, L.; Weisenpacher, P. Animation of forest fire simulation. *Proceedings of the Int. Conference on Environmental Applications and Distributed Computing*, Bratislava, 2006
- [13] Glasa, J.; Weisenpacher, P. Computer reconstruction of a fire in Slovak Paradise National Park in October 2000, Research Report No. APVT-2007-03, Institute of Informatics, Slovak Academy of Sciences, June 2007
- [14] Halada, L.; Weisenpacher, P. Principles of forest fire spread models and their simulation, *Journal of the Applied Mathematics, Statistics and Informatics*, 1, 1, 3-13, 2005
- [15] Halada, L.; Weisenpacher, P.; Glasa, J. Reconstruction of forest fire propagation case when people were entrapped by fire, *Proceedings of the International Conference on Forest Fire Research*, Figueira da Foz, 2006
- [16] Harvey, S.; Ruegsegger, M.; Allgower, B. Fuel models for Switzerland (Swiss National Park), Final Report of EU RP Minerve 2, No. EV5VCT-0570, Zurich, 1997
- [17] Hille, M.; Goldammer, J. G. Dispatching and modeling of fires in Central European pine stands: new research and development approaches in Germany. *Proceedings of the Workshop at Agronomic Institute of Chania*, Crete, 59-74, 2001
- [18] Juhás, F. *Forest fire in the Slovak Paradise National Park: October 2000* (in Slovak). Požiarny a záchranný zbor SR, Spišská Nová Ves, 2000
- [19] Linn, R. R.; Reisner, J.; Colman, J. C.; Winterkamp, J. Studying wildfire behaviour using FIRETEC, *Int. Journal of Wildland Fires*, 11, 233-246, 2002
- [20] Lopés, A. M. G.; Cruz, M. G.; Viegas, D. X. FireStation – an integrated software system for the numerical simulation of fire spread on complex topography, *Environmental Modelling and Software*, 17, 3, 269-285, 2002

- [21] Majlingová, A.; Vida, T.; Tuček, J. Fuel models specification for fire modeling and simulation purposes using existing information about forests. *Proceedings of the Int. Conference on Fire Safety*, Novi Sad, 444-455, 2006
- [22] McGrattan, K. B. (Ed.) Fire Dynamics Simulator (Version 4), Technical Reference Guide. NIST Special Publication 1018, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, July 2004
- [23] McGrattan, K. B. (Ed.) Fire Dynamics Simulator (Version 4), User's Guide. NIST Special Publication 1019, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, July 2004
- [24] Mell, W. E.; Manzello, S. L.; Maranghides, A. Numerical modelling of fire spread through trees and shrubs, *Forest Ecology and Management*, 234S, 82, 2006
- [25] Mell, W. E.; Jenkins, M. A.; Gould, J.; Cheney, P. A physics-based approach to modelling grassland fires, *International Journal of Wildland Fire*, 16, 1, 1-22, 2007
- [26] Morvan, D.; Dupuy, J. L. Modeling the propagation of a wildfire through a Mediterranean shrub using a multiphase formulation, *Combustion and Flame*, 138, 199-210, 2004
- [27] Oldehof, R. Taming complexity in high-performance computing, *Mathematics and Computers in Simulation*, 54, 314-357, 2000
- [28] Oliveras, I.; Pinol, J.; Viegas, D. X. Generalization of the fire line rotation model to curved fire lines, *International Journal of Wildland Fire*, 15, 447-456, 2006
- [29] Pajorová, E.; Hluchý, L.; Halada, L.; Slížik, P. 3D visualization tool for virtual models of natural disasters, *Proceedings of the Virtual Reality International Conference*, Laval, France, 37-43, 2007
- [30] Škvarenina, J.; Mindás, J.; Holécy, J.; Tuček, J. An analysis of the meteorological conditions during two largest forest fire events in the Slovak Paradise National Park, *Journal of Meteorology*, 7, 167-171, 2004
- [31] Tuček, J.; Majlingová, A. *Forest fires in Slovak Paradise National Park: applications of geoinformatics* (in Slovak), Technical University in Zvolen, 2007
- [32] Tuček, J.; Schmidt, M.; Celer, S. Clasification of vegetal cover in high mountain conditions from high-density RSA data using aprior knowledge (in Slovak). *Acta Facultatis Forestalis*, XLVII, 91-102, 2005
- [33] Viegas, D. X. Forest fire propagation, *Phil. Trans., R. Soc. London*, 356, 2907-2928, 1998
- [34] Viegas, D. X. *Surrounded by fire* (in Portugal), Editorial Minerva, Coimbra, 2004
- [35] Viegas, D. X. Analysis of eruptive fire behaviour, *Proceedings of the International Conference on Forest Fire Research*, Figueira da Foz, 2006
- [36] Viegas, D. X. Analysis of Eruptive Fire Behaviour, *Forest Ecology and Management*, 234S, 5, 2006
- [37] Viegas, D. X.; Rossa, C.; Caballero, D.; Pita, L. P. C.; Palheiro, P. Analysis of accidents in 2005 fires in Portugal and Spain, *Proceedings of the International Conference on Forest Fire Research*, Figueira da Foz, 2006
- [38] Viegas, D. X.; Rossa, C.; Oliveras, I.; Piñol, J. Fireline rotation model, *Proceedings of the Int. Conference on Forest Fire Resarch*, Figueira da Foz, Coimbra, 2006
- [39] Wallace, G. A numerical fire simulation model, *International Journal of Wildland Fires*, 3, 2, 111-116, 1993
- [40] Weisenpacher, P. Forest fire simulation capability of WFDS system, *Proceedings of the International Conference on Protection of Natural Disaster Disturbed Areas*, Strbske Pleso, 2007, 227-237

- [41] Xanthopoulos, G. Forest fighting organization and approaches to the dispatching of forces in the European Union: results of the workshop survey, Proc. of Int. Workshop on Improving Dispatching for Forest Fire Control, Chania, Crete, 2002, 143-153

Resumé

In the paper, existing methods, models and program systems for the forest fire simulation are briefly summarized. The use of advanced Fire Area Simulator FARSITE adapted for specific conditions in Slovakia is demonstrated by computer reconstruction of the fire in locality Krompla in Slovak Paradise National Park in October 2000 which caused the death of six people. The computer simulation brought new knowledge about the way how the fire could be originated and why it had such an elongated oval shape after the first hours. The simulation confirmed that the group of six people could be entrapped by the fire just at the time of tragic event. The results indicate that the unexpected abrupt change of fire behaviour which led to the tragedy was induced by change of meteorological conditions and terrain topography at the critical time. The computer simulation also showed that the fire could not begin from any single ignition point as it was assumed before by forestry specialists. The results, consulted with the heads of Fire Department who were at the place in 2000, confirmed that the use of proper fire simulator can help to predict dangerous fire behaviour in concrete region to prevent tragic human incidents and makes it possible in advance to analyse and visualize possible fire situations as well as to estimate the shape and size of burning area to make substantially easier to suggest the most effective ground and/or aerial tactics and required personnel, maintenance and supply for successful fire localization. Some challenges and topics for future research are also included.