

dr hab. inż. **Tadeusz MACIAK**

mgr inż. **Tomasz CZERPAK**

Wydział Informatyki, Politechnika Białostocka

MODELOWANIA POŻARU LASU. CZĘŚĆ IV. MODELE INICJACJI I ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ OGNI KORON DRZEW.

Forest fire modelling. Part IV. Models of the initiation and spread of crown fire.

Streszczenie

W pracy zaprezentowano matematyczny sposób modelowania pożaru koron drzew lasu oraz omówiono model roznoszenia płonących fragmentów roślinności przez wiatr. Oba modele są stosowane w oprogramowaniu FARSITE. Model pożaru koron drzew został przedstawiony zgodnie z teorią Van Wagnera. Zaprezentowane równania są częściowo empiryczne. Za pomocą modelu Van Wagnera można określić, czy ogień pozostaje tylko w przestrzeni paliw powierzchni, czy przenosi się na korony drzew. Paliwa koron są traktowane jako jednorodna warstwa umiejscowiona na stałej wysokości od podłoża, posiadająca określoną głębokość i gęstość. W rozważanych modelach nie są brane w wyraźny sposób pod uwagę różne mechanizmy przenikania ciepła takie jak np. promieniowanie, konwekcja lub przewodzenie. Przyjęcie jednorodnej warstwy koron drzew jest podstawowym założeniem współczesnych modeli służących do przewidywania zachowania się ognia. W rzeczywistości warunki te są spełnione tylko w siedliskach gęstych lasów składających się z drzew bardzo podobnych jeśli chodzi o wiek i rozmiar. Nie są natomiast spełnione w siedliska o zmiennej gęstości drzew. Model roznoszenia płonących fragmentów roślinności przez wiatr został zaprezentowany na podstawie opracowania Albiniego. Modelowane zjawisko może mieć bardzo duży zasięg. Płonące żagwie mogą przenosić się z wiatrem na wiele kilometrów, dramatycznie zmieniając rozwój pożaru. Symulacja tego zjawiska opiera się przede wszystkim na określeniu lokalizacji płonących fragmentów o różnych rozmiarach. Odległość przenoszenia płonących żagwi na nierównym terenie zależy przede wszystkim od: wielkości żagwi, pionowego profilu prędkości wiatru oraz od topografii powierzchni w kierunku przenoszenia niedopałków. Model Albiniego pozwala obliczyć poziom, do którego unoszone są płonące cząstki oraz zasięg zagrożenia pożarowego. W trzeciej części pracy pokazano w jaki sposób z niepełnych danych będących w posiadaniu Dyrekcji Lasów Państwowych można oszacować dane wejściowe do symulacji pożaru kompleksu leśnego w oprogramowaniu FARSITE.

Summary

The paper presents a mathematical method of modeling the forest crown fires, and discusses a model of delivering the burning fragments of vegetation by the wind. Both models are used in FARSITE software. Crown fire model has been presented in accordance with the theory of Van Wagner. The presented equations are partially empirical. With the help of Van Wagner's model to determine if the fire is only in the area of fuel

surface, and moves to the crowns of trees. Crown fuels are treated as a homogeneous layer located at a constant height from the floor, having a specified depth and density. The models under consideration are not taken explicitly into account the different heat transfer mechanisms such as radiation, convection or conduction. The adoption of a uniform layer of the crown is the basic assumption of contemporary models to predict the behavior of fire. In fact, these conditions are met only in dense forest habitats consisting of trees are very similar in terms of age and size. There are, however, met with a variable density of habitat trees. Model spreading flaming fragments of vegetation by the wind was presented on the basis of the development of Albini. Modeled phenomenon may have a very large range. The burning of charcoal can move with the wind for miles, dramatically altering the development of a fire. The simulation of this phenomenon is based primarily on identifying the location of burning fragments of different sizes. Distance transmission burning charcoal in the rough terrain depends primarily on: the size of charcoal in the vertical profile of wind speed and surface topography of cigarette butts in the conveying direction. Albini model allows to calculate the degree to which particles are lifted and the extent of burning fire hazard. In the third part of the paper shows how the incomplete data held by the RDLP in Białystok can estimate the input to the simulation of complex forest fire in FARSITE software.

Słowa kluczowe: modele pożaru lasu, model pożaru koron drzew;

Keywords: forest fire modeling, crown fire model;

1. Wprowadzenie

W poprzednich publikacjach przedstawiono modele pożaru lasu oraz zaprezentowano wybrane oprogramowania służące do modelowania rozwoju pożarów kompleksów leśnych [1,2]. Symulacja pożaru lasu została przeprowadzona w stosowanym przez Urząd Leśny Ministerstwa Rolnictwa USA oprogramowaniu FARSITE [3]. FARSITE wykorzystuje opisane w pracy [1] matematyczne modele pożaru roślinności takie jak model pożaru powierzchni podłoża [4], pożaru koron drzew [5,6] oraz model roznoszenia płonących fragmentów roślinności [7]. Podstawą implementacji programu jest zastosowanie zasady propagacji fali Huygensa do symulacji wzrostu frontu pożaru [8,9]. FARSITE jest programem zgodnym z Systemami Informacji Geograficznej GIS (*Geographic Information Systems*). Przedstawiona w pracy [2] przykładowa symulacja dotyczyła rozprzestrzeniania się pożaru roślinności w wybranym kompleksie leśnym w pobliżu Nowogrodu.

W celu przedstawienia polskiemu czytelnikowi szerzej obszernego problemu symulacji pożarów kompleksów leśnych, omawiana tematyka została rozszerzona o następne publikacje. W kolejnej pracy zostały przedstawione problemy tworzenia modeli paliwowych [10]. Bieżąca publikacja (czwarta z serii), ma na celu uzupełnienie wiedzy z zakresu modelowania pożaru koron drzew oraz przedstawienie modelu roznoszenia płonących fragmentów roślinności przez wiatr.

2. Modele inicjacji i rozprzestrzeniania ognia koron drzew

Aby przejść do modelu inicjacji i rozprzestrzeniania się ognia koron drzew należy najpierw określić intensywność linii ognia pożaru powierzchni lasu. W swoich rozważaniach Van Wagner [5] zasugerował, że niezależne pożary koron są bardzo rzadkie i krótkotrwałe. Stąd niezależny pożar koron drzew nie jest włączany do analizy wykonywanej

w oprogramowaniu FARSITE. Założył on, że współczynnik rozprzestrzeniania się pasywnego pożaru koron jest równy współczynnikowi rozprzestrzeniania się pożaru powierzchni paliw znajdujących się poniżej płonących koron. Należy zaznaczyć, że przedstawiony poniżej model Van Wagnera bazuje na badaniach doświadczalnych i z tego względu należy go sklasyfikować jako pół empiryczny.

2.1. Intensywność linii ognia pożaru powierzchni

Intensywność linii ognia I_b , zgodnie z modelem Byrama [11], opisuje ilość energii wyemitowanej na jednostkę długości frontu pożaru (kW m^{-1}), co przedstawia wyrażenie:

$$I_b = hwR/60 \quad (1)$$

gdzie h reprezentuje ciepło właściwe paliwa (kJ kg^{-1}). Parametr w oznacza masę paliwa na jednostkę powierzchni, spalonego na froncie pożaru (kg m^{-2}), natomiast $R/60$ jest to współczynnik rozprzestrzeniania pożaru powierzchni przekształcony do wymiaru jednostek SI (m s^{-1}). Zależność (1) można również zapisać w postaci:

$$I_b = \frac{I_R 12,6 R}{60 \sigma} \quad (2)$$

gdzie I_R jest intensywnością reakcji (intensywnością wydzielania ciepła na jednostkę powierzchni frontu pożaru), zaś σ oznacza charakterystyczny współczynnik powierzchni do objętości dla warstwy paliwowej. Cechy czoła pożaru (współczynnik rozprzestrzeniania, intensywność linii ognia itp.) są zależne od bieżących warunków środowiska takich jak rodzaj paliwa, wilgotność, prędkość i kierunek wiatru oraz topografia terenu czyli nachylenia i ekspozycje. Do wykonania dobrej symulacji niezbędne jest, aby każdy z tych parametrów był dostępny i przeliczalny dla każdego punktu terenu.

2.2. Pożar koron drzew

Zjawisko pożaru koron drzew zachodzi ponad pożarem warstwy powierzchniowej i paliw powierzchniowych. Model pożaru koron drzew użyty w oprogramowaniu FARSITE został opracowany przez Van Wagnera [5,12] i jest podobny do zastosowanego w systemie oprogramowania kanadyjskiego (*Forest Fire System Info Behavior*) [13]. Istnieje wiele modeli zarówno inicjacji jak i rozwoju pożaru koron. Model Van Wagnera określa czy ogień pozostaje tylko w przestrzeni paliw powierzchni, czy przenosi się na korony drzew oraz czy rozprzestrzenia się aktywnie w koronach czy ogranicza się jedynie do pożaru pojedynczych drzew. W modelu przyjęto, że krytyczna intensywność ognia niezbędna do inicjacji ognia korony I_0 (kWm^{-1}) zależy przede wszystkim od współczynnika wilgotności liści M (który reprezentuje procent suchej masy, określający energię zapłonu koron), oraz wysokości podstawy korony drzewa CBH (*Crown Base Height* (m)):

$$I_0 = (0,010 CBH (460 + 25,9 M))^{3/2} \quad (3)$$

Wysokość podstawy korony jest to pionowa odległość pomiędzy powierzchnią ziemi a żywym paliwem korony. W praktyce powinny być jeszcze uwzględniona obecność i wpływ tzw. „drabiny” paliw, czyli martwych gałęzi i małych drzew pomiędzy powierzchnią a koronami, co może skutecznie obniżyć wartość CBH [5,12,14]. Inicjacja pożaru korony następuje wtedy, gdy intensywność ognia powierzchni dla danego punktu obliczona ze wzoru (1) wynosi lub przekracza I_0 . Typ pożaru korony zależy jest od progu określonego dla rozprzestrzeniania się aktywnego pożaru korony RAC zgodnie z modelem Alexandra [14]:

$$RAC = 3,0 / CBD \quad (4)$$

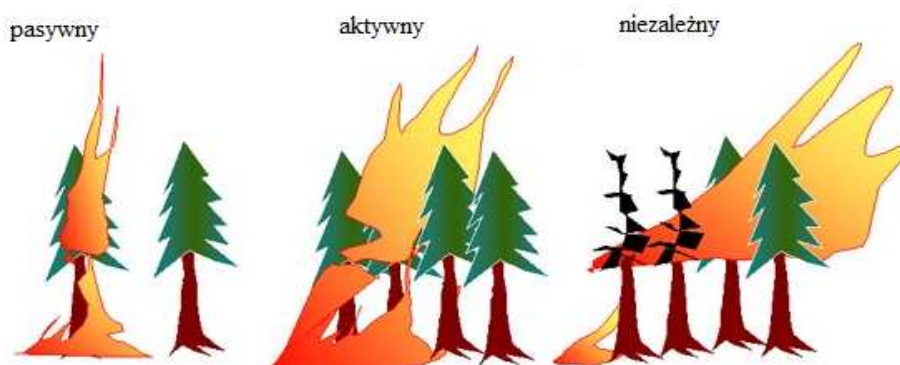
Gdzie CBD jest to gęstość średnia korony (kg m^{-3}), a wartość 3,0 jest stałą empiryczną.

Van Wagner [5] wyodrębnił trzy rodzaje pożaru korony uzależnione od I_0 i RAC :

- pasynywny pożar koron ($I_b \geq I_0$, $R_{\text{Cactual}} < RAC$),
- aktywny pożar koron ($I_b \geq I_0$, $R_{\text{Cactual}} \geq RAC$, $E < E_0$),
- niezależny pożar koron ($I_b > I_0$, $R_{\text{Cactual}} \geq RAC$, $E > E_0$).

E i E_0 oznaczają aktualny oraz krytyczny strumień energii odpowiednio w kierunku postępu płomienia, a R_{Cactual} określa aktualny współczynnik rozprzestrzeniania się aktywnego pożaru koron.

Na rysunku 1 przedstawiono w sposób graficzny wyróżnione przez Van Wagnera przypadki pożaru koron.



Ryc. 1. Rodzaje pożaru koron drzew [3].

Fig. 1. Types of wind driven crown fire [3].

Jak już wspomniano, Van Wagner zasugerował, że niezależne pożary koron są bardzo rzadkie i krótkotrwałe. Stąd, nie oblicza się zarówno E oraz E_0 a niezależny pożar koron drzew nie jest uwzględniany w oprogramowaniu FARSITE.

Współczynnik rozprzestrzeniania się pasywnego pożaru koron jest równy współczynnikowi rozprzestrzeniania się pożaru powierzchni paliw znajdujących się poniżej

plonących koron. Natomiast aktualny współczynnik rozprzestrzeniania się aktywnego pożaru koron dla *i*-tego wierzchołka $R_{Cactual}$ ($m \min^{-1}$) określa się wykorzystując maksymalny współczynnik rozprzestrzeniania pożaru koron (R_{Cmax}) zgodnie ze wzorem:

$$R_{Cactual} = R + CFB(R_{Cmax} - R) \quad (5)$$

jeśli $R_{Cactual}$ osiąga lub przewyższa RAC , gdzie:

$$R_{Cmax} = 3,34 R_{10} E_i \quad (6)$$

a $3,34R_{10}$ jest współczynnikiem rozprzestrzeniania aktywnego pożaru koron ($m \min^{-1}$) określonym na podstawie korelacji ze średnim współczynnikiem rozprzestrzeniania pożaru powierzchni dla modelu 10 Paliw „U.S. Fuel Model 10” z wykorzystaniem współczynnika redukcji wiatru równego 0,4 [8]. R jest współczynnikiem rozprzestrzeniania się ognia. CFB jest ułamkiem spalonych koron.

W tym przypadku, mimo iż pierwotnie współczynnik 3,34 został wykorzystany do wyznaczenia średniego współczynnika rozprzestrzeniania pożaru koron, zostanie on wykorzystany do określenia maksymalnego współczynnika rozprzestrzeniania pożaru. Niemniej jednak korelacja pozostaje niezależna od struktury korony, a niepewność w przewidywaniu współczynników rozprzestrzeniania pożaru korony nie może być ustalona poprzez proste dostosowanie tego współczynnika.

Liczba E_i jest ułamkiem współczynnika rozprzestrzeniania przodu pożaru korony ($E_i \leq 1$) osiąganym dla *i* – tego obwodu wierzchołka, określającego orientację tego wierzchołka w stosunku do kierunku maksymalnego rozprzestrzeniania się ognia i wymiarów eliptycznych pożaru koron. CFB jako ułamek spalonych koron, określa proporcję drzew uczestniczących w koronowej fazie pożaru. Zgodnie z modelem Van Wagnera [5]:

$$CFB = 1 - e^{-a_c(R - R_0)} \quad (7)$$

Parametr a_c występujący w wykładniku e skaluje CFB do wartości równej 0,9, kiedy współczynnik rozprzestrzeniania pożaru powierzchni osiąga 90% różnicy pomiędzy RAC a krytycznym współczynnikiem rozprzestrzenia pożaru powierzchni R_0 (równanie (1):

$$a_c = \frac{-\ln(0.1)}{0.9(RAC - R_0)} \quad (8)$$

$$R_0 = I_0 \frac{R}{I_b} \quad (9)$$

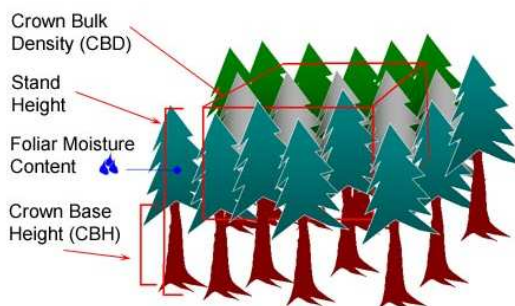
R_0 jest liczone z I_0 wykorzystując tylko część zużytego paliwa powierzchni na froncie ognia w porównaniu do całkowitego zużycia paliwa [13].

Powiązanie modelu rozprzestrzeniania ognia korony Van Wagnera i modelu rozprzestrzeniania ognia powierzchni Rothermela [4] wymaga zastosowania dodatkowych ustaleń. Współczynnik użyty do skalowania CFB jest obliczany zgodnie z ustaleniami Van Wagnera. Podobnie koncepcja przejścia pasywnego pożaru koron w pożar aktywny jest zgodna z założeniami modelu Van Wagnera i powoduje dyskretny skok współczynnika rozprzestrzeniania ognia kiedy $R_{Cactual}$ osiąga lub przekracza progową wartość RAC .

Intensywność ognia korony I_c (kW m^{-1}) jest obliczana dla danego wierzchołka poprzez modyfikację równania Byrama (równanie (1)) określającego I_b . Wykorzystano w nim łączne obciążenie paliw korony i paliw powierzchni strawionych przez ogień na froncie płomieni, oraz współczynnik rozprzestrzeniania aktywnego pożaru koron $R_{Cactual}$ lub pasywnego pożaru koron R .

$$I_c = 300 \left(I_b / 300R + CFB \cdot CBD (H - CBH) \right) R_{Cactual} \text{ or } R \quad (10)$$

Gdzie H jest wysokością korony (m) a ciepło właściwe paliw powierzchni i koron zostało zsumowane. Wynosi ono 18000 kJ kg^{-1} [6].



Ryc. 2. Parametry drzewostanu używane do modelowania pożaru koron lasu w oprogramowaniu FARSITE [3].

Fig. 2. The parameters used for modeling of tree crown forest fire in FARSITE software [3].

3. Unoszenie płonących fragmentów roślin (*spotting*)

Angielski termin „*spotting*” określa zjawisko polegające na powstawaniu nowych ognisk ognia przed frontem pożaru poprzez przenoszenie płonących fragmentów roślinności przez wiatr. Zjawisko to ma nieraz bardzo duży zasięg a ogień może przenosić się na wiele kilometrów pokonując bariery, dramatycznie zmieniając parametry oraz zachowanie pożaru. Symulacja tego zjawiska opiera się przede wszystkim na określeniu lokalizacji płonących fragmentów o różnych rozmiarach. Jednym z najpopularniejszych modeli opisujących ten problem jest model oparty na równaniach Albiniego [7] opisujących „*spotting*” z płonących

drzew. Płonące drzewa są źródłem licznych płonących fragmentów roślinności (żagwi), które mogą być wyniesione wysoko poprzez wiatr.

Odległość przenoszenia płonących fragmentów roślinności na nierównym terenie zależy przede wszystkim od wielkości żagwi, pionowego profilu prędkości wiatru oraz od topografii powierzchni w kierunku przenoszenia niedopałków. Spośród wymienionych parametrów bardzo ważny jest rozmiar, gdyż jak łatwo się domyślić większa żagiew płonie dłużej, ale nie zostanie przeniesiona tak daleko jak mniejsza. Model Albiniego pozwala obliczyć poziom, do którego unoszone są płonące cząstki jako wysokość gdzie czas trwania dynamicznego przepływu struktury płonącego drzewa (t_f) jest równy czasowi potrzebnemu cząstce na podróż w górę od jej źródła (t_0).

$$t_f = t_0 + 1.2 + \frac{a_x}{3} \left(\left(\frac{b_x + z/z_F}{a_x} \right)^{3/2} - 1 \right) \quad (11)$$

Gdzie:

z = wysokość cząsteczki (m)

z_F = wysokość płomienia (m)

Stałe a i b zgodnie z modelem Albiniego dotyczą struktury płomienia

$$a_x = 5,963$$

$$b_x = 4,563$$

Natomiast:

$$t_t = t_0 + t_1 + t_2 + t_3 \quad (12)$$

t_0 jest czasem stałego spalania koron drzew. Zarówno t_0 jak i z_F są określone dla cech charakterystycznych poszczególnych gatunków, średnic drzew i liczby płonących drzew w grupie. t_1 jest czasem w którym cząstka podróżuje ze swojej początkowej wysokości do szczytu płomienia przy czym:

$$t_1 = 1 - (z_0/z_F)^{1/2} + \frac{v_o}{w_F} \ln \left(\frac{1 - v_o/w_F}{(z_0/z_F)^{1/2} - v_o/w_F} \right) \quad (13)$$

t_2 jest to czas podróży cząstki przez strefę przejściową pomiędzy szczytem płomienia a pióropuszem ognia i dymu określony w postaci:

$$t_2 = 0.2 + B \left(\frac{D_p}{z_F} \right)^{1/2} \left(1 + B \left(\frac{D_p}{z_F} \right)^{1/2} \ln \left(1 + 1 / \left(1 - \left(\frac{D_p}{z_F} \right)^{1/2} \right) \right) \right) \quad (14)$$

zaś t_3 jest to czas podróży cząstki w pióropuszu ognia i dymu obliczony według zależności:

$$t_3 = \frac{a_x}{0.8v_0/w_F} \left(\ln \left(\frac{1 - 0.8v_0/w_F}{1 - 0.8rv_0/w_F} \right) - 0.8(v_0/w_F)(r-1) - \frac{1}{2}(0.8v_0/w_F)^2(r-1)^2 \right) \quad (15)$$

Gdzie:

v_0 – prędkość końcowa cząstki (m s^{-1})

w_F – prędkość płomienia gazowego (m s^{-1})

$r = ((b+z/z_F)/a)^{1/2}$

D_p = średnica cząstki (m)

$B = 40$

$v_0/w_F = B(D/z_F)^{1/2}$ (bezwymiarowe)

Do obliczania wysokości wynoszenia cząstek stosuje się kilka istotnych założeń:

- a. zakłada się, że cząstki pochodzą z górnej części korony,
- b. podstawa płomienia jest równa połowie wysokości całkowitej,
- c. cząstki mają kształt cylindrów o stałym ciężarze właściwym $0,3 \text{ (g cm}^{-3}\text{)}$ i współczynniku oporu $C_D = 1,2$,
- d. cząstki są wynoszone pionowo ponad płonące drzewa. (np. nie występuje podróżowanie z wiatrem podczas wynoszenia).

Uniesione przez wiatr palące się fragmenty roślinności zaczynają opadać. Cząstka opada w tempie malejącym ze względu na utratę gęstości i objętości w czasie spalania.

Znajduje to odzwierciedlenie w jej prędkości końcowej, a jej wysokość z w czasie t określa zależność:

$$z(t) = z(0) - v_0(0) \left(t/\tau - \frac{1}{2} (t/\tau)^2 \right) \quad (16)$$

gdzie:

$$\tau = 4C v_0(0) / K\pi g$$

$$K = 0,0064$$

g - przyspieszenie ziemskie ($9,81 \text{ m s}^{-2}$)

Końcowa prędkość cząstki v_0 wyraża się równaniem:

$$v_0 = (\pi g \rho_s D_p / 2C_D \rho_a)^{1/2} \quad (17)$$

gdzie:

ρ_s - gęstość zwęglonego drewna ($0,3 \text{ g cm}^{-3}$)

ρ_a - gęstość powietrza ($1,2 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$)

C_D - współczynnik oporu cylindrycznej cząstki (1,2)

W momencie kiedy cząstka opada, jej współczynnik przemieszczania w poziomym kierunku jest uzależniony od prędkości wiatru na danej wysokości. Prędkość wiatru maleje logarytmicznie w miarę zmniejszania wysokości w kierunku koron drzew (H , m):

$$\frac{dx}{dt} = U_H \ln(z/z_0) / \ln(H/z_0) \quad (18)$$

gdzie:

z_0 = długość tarcia ($0,4306 H$, (m))

H = wysokość (m) koron lasu

natomiast prędkość wiatru U_H (m s^{-1}) na wysokości H zgodnie z modelem Albiniego i Baughmana [15] określa równanie:

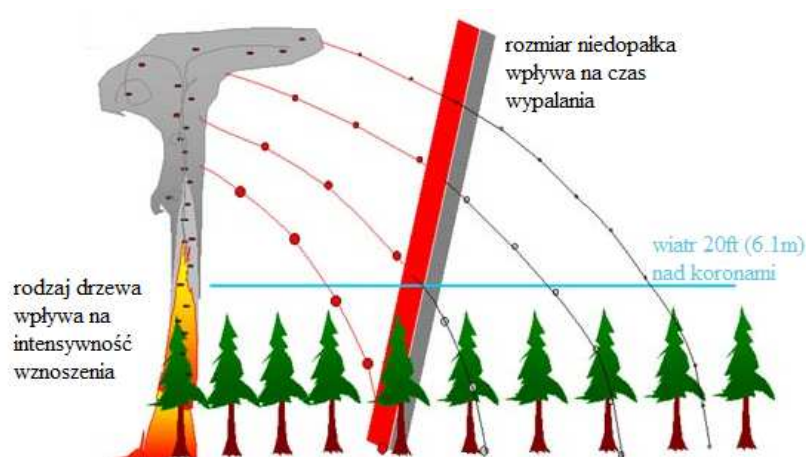
$$U_H = \frac{U_{20+H}}{\ln((20+1.18H)/0.43H)} \quad (19)$$

Po kontakcie z powierzchnią ziemi opadłe niedopałki mogą być przyczyną nowego zapłonu paliwa jeśli:

- nie opadły na spalony obszar,
- wylądowały na podłożu palnym,
- podłoże paliwowe może być zapalone od płonącego fragmentu roślinnego.

Ciągle palące się fragmenty roślinności, gdy osiągają grunt mogą rozpalić nowy pożar o ile nie wylądowały w obszarze aktualnego pożaru lub w tzw. enklawie pożarowej czyli powierzchni pokrytej niepalnymi paliwami. W celu opisanie wielu czynników, mających wpływ na zapłon i nie dających się określić ilościowo, mechanicznie lub przestrzennie wprowadzono na potrzeby opracowania pojęcie „częstotliwości zapłonu”. Jednym z najważniejszych czynników z tej grupy jest różnorodność podłoża paliwowego. Dodatkowe czynniki to przede wszystkim filtrowanie niedopałków przez korony drzew, wilgotność paliw powierzchni, temperatura paliw oraz inne właściwości fizyczne i cieplne paliw (spróchniałe drewno lub odchody zwierząt), które różnią się miejscem występowania.

W wielu systemach modelowania pożaru roślinności tak jak w programie FARSITE stosowane są różne klasy wielkości cylindrycznych fragmentów płonącego materiału np. od średnicy około 0,15 cm do 2,5 cm.



Ryc. 3. Czynniki wpływające na przenoszenia ognia przez niedopałki [3].

Fig. 3. Factors affecting spotting [3].

Należy dodać, że prędkość wiatru wprowadzana jako dana wejściowa do oprogramowania jest to prędkość wiatru mierzona na wysokości 20 stóp (6,1m) powyżej górnej roślinności (koron drzew).

4. Symulacja pożaru w oprogramowanie FARSITE

Aby uruchomić symulację trzeba do programu FARSITE wczytać pięć podstawowych warstw danych rastrowych z plików w formatach GRASS ASCII (format plików programu GRASS do edycji danych GIS) oraz ARC GRID ASCII. Wymagane warstwy to: wysokości (DEM – *Digital Elevation Model* czyli Numeryczny Model Terenu), nachylenia (*Slope*), ekspozycje (*Aspect*), paliwa (*Fuel Model*) oraz pokrycie terenu koronami drzew (*Canopy Cover*). Dodatkowe warstwy danych takie jak: wysokość drzew (*Canopy Height*), wysokości podstawy koron od ziemi do dołu korony (*Crown Base Height*), gęstość koron (*Crown Bulk Density*) są istotne przede wszystkim w symulacji pożaru koron drzew, ale nie są niezbędne do uruchomienia symulacji. Wszystkie te wymienione trzy warstwy w programie łączone są w jeden plik o rozszerzeniu *.lcp czyli tzw. plik krajobrazu. Bardzo ważne jest, aby wczytywane do programu warstwy spełniały kilka podstawowych warunków. Poszczególne warstwy muszą być kompatybilne, identycznej rozdzielczości, o takim samym zakresie, przedstawione w takim samym rzucie oraz zgodne z systemem współrzędnych bazującym na siatce prostokątów np. system UTM - *Universal Transverse Mercator*.

W tabeli 1 zebrano wszystkie warstwy danych potrzebne do wczytania w oprogramowaniu FARSITE.

Tabela 1.

Warstwy danych potrzebne do symulacji w programie FARSITE, wraz z wymaganymi jednostkami wg [3].

Table 1.

Layers of data needed to simulate the FARSITE program, with the required units according to [3].

Warstwa (Layer)	Wymagana (Required)	Standardowe jednostki (The standard units)	Alternatywne jednostki (An alternative units)
Wysokości (<i>elevation</i>)	Tak	Metry	Stopy
Nachylenia (<i>slope</i>)	Tak	Stopnie	Procenty
Ekspozycje (<i>aspect</i>)	Tak	Kategorie 1-25	Stopnie
Model paliwowy (<i>fuel model</i>)	Tak	Standardowe modele paliwowe powierzchni	Niestandardowe lub konwertowane modele
Pokrycie koronami	Tak	Kategorie 1-4	Procenty

(<i>canopy cover</i>)			
Wysokości drzew (<i>tree height</i>)	Nie	Metry*10	Metry, stopy, stopy*10
Wysokość podstaw koron (<i>crown base height</i>)	Nie	Metry*10	Metry, stopy, stopy*10
Gęstość koron (<i>crown bulk density</i>)	Nie	kg/m ³ *100	kg/m ³ , funt/stopę ³ , funt/stopę ³ * 100
Obciążenie próchnicą (<i>duff loading</i>)	Nie	t/ha	t/akr
Martwe grube paliwa drzewne (<i>coarse woody</i>)	Nie	Model paliw grubych drzewnych	Nie dotyczy

Dwie ostatnie warstwy nie były wykorzystane w tworzonej symulacji.

5. Przygotowanie danych wejściowych

5.1. Dane udostępnione przez Dyрекcję Lasów Państwowych

Jak przedstawiono w pracy [2] dla wybranego do symulacji pożaru obszaru leśnego Regionalna Dyrekcja Lasów Państwowych udostępniła kilka podstawowych warstw danych. Dane te zostały opracowane z przeznaczeniem dla Państwowej Straży Pożarnej jako istotne dla prowadzenia akcji ratowniczej w przypadku pożaru kompleksu leśnego. Udostępniono przede wszystkim mapę numerycznego modelu terenu opracowaną przy okazji tworzenia projektu planu urządzenia lasu. W udostępnionych danych znalazło się 5 dodatkowych warstw wektorowych zapisanych w formacie *.shp. Warstwy opisują: bud_pol.shp – budynki (tylko te znajdujące się w obrębie kompleksu leśnego np. leśniczówki), ciek_lin.shp – ciek wodne, kom_lin.shp – linie komunikacyjne, ppoz_shp – punktowe obiekty ochrony ppoż, oraz wydz_pol.shp – wydzielenie leśne. Warstwa wydz_pol.shp zawiera ponadto szereg informacji dodatkowych dołączonych do niej w postaci pliku bazy danych *.dbf. Do warstwy odatkowo wprowadzono następujące kolumny atrybutów:

ADR_LES – adres leśny

ADR_ADM – adres administracyjny

TSL – typ siedliska leśnego

NACHYL – nachylenie

RODZ_POW – rodzaj powierzchni

GP_IGL_UDZ – udział gatunków iglastych w górnym piętrze

GP_LISC_UD – udział gatunków liściastych w górnym piętrze

GP_WIEK – wiek górnego piętra

GP_WYS – wysokość górnego piętra

GP_ZWARCIE – zwarcie górnego piętra

DP_IGL_UDZ – udział gatunków iglastych w dolnym piętrze
 DP_LISC_UD – udział gatunków liściastych w dolnym piętrze
 DP_WIEK – wiek dolnego piętra
 DP_WYS – wysokość dolnego piętra
 DP_ZWARCIE – zwarcie dolnego piętra
 PODSZYT – podszyt (jest/nie ma)

5.2. Określenie pokrycia powierzchni terenu koronami drzew

Do udostępnionej warstwy wydzielenia leśnego wydz_pol.shp, w jej tabeli atrybutów była dołączona kolumna GP_ZWARCIE opisująca zwarcie górnego piętra drzewostanu dla poszczególnych części mapy. Zgodnie z kolumnami tabeli atrybutów opisującymi dolne piętro kompleksów leśnych, w lasach Nadleśnictwa Nowogród dolnego piętra nie ma. Wobec tego do określenia pokrycia terenu koronami wykorzystano opis zwarcia górnego piętra określonego w kolumnie GP_ZWARCIE. Zgodnie z terminologią leśną zwarcie, w którym korony są rozmieszczone względem siebie na poziomie jednego piętra nazywamy zwarcie poziomym.



Ryc. 4. Schemat zwarcia poziomego drzew w drzewostanie [16].

Fig. 4. Short diagram of a horizontal tree in the forest stand [16].

W kolumnie GP_ZWARCIE zwarcie koron drzew opisane jest szacunkowo za pomocą następujących stopni [16]:

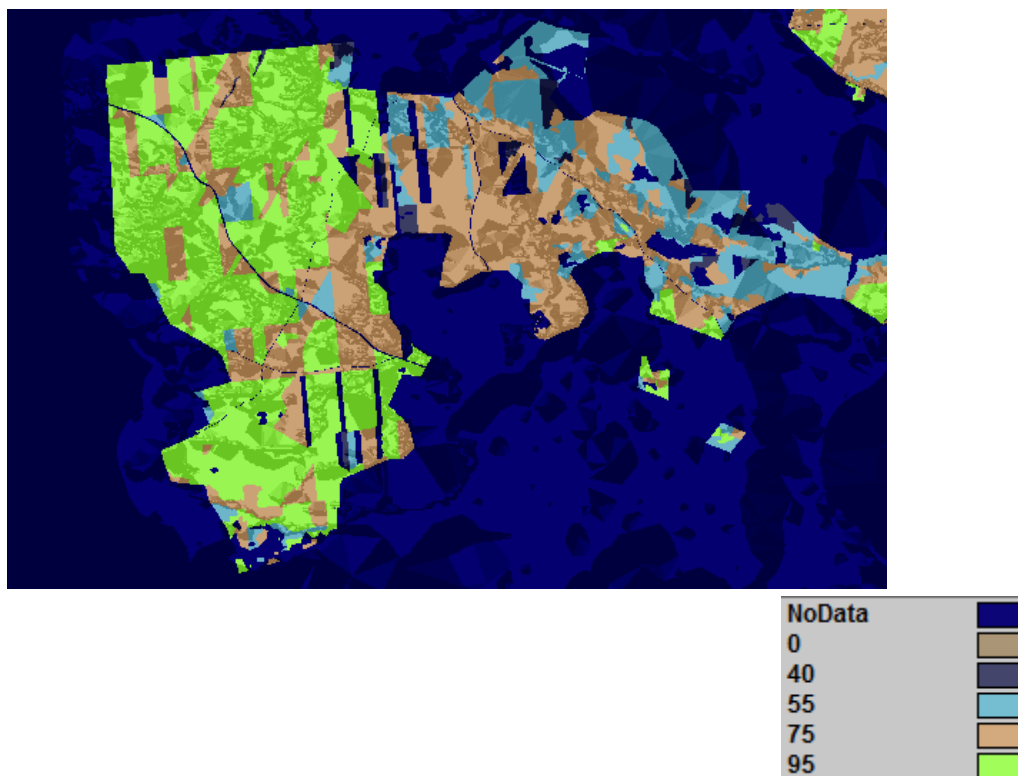
- zwarcie silne (1,2-1,1), korony wielu drzew napierają na siebie, zachodzą;
- zwarcie pełne (1,0-0,9), korony stykają się brzegami, w nielicznych przypadkach napierają na siebie, zachodzą;
- zwarcie umiarkowane (0,8-0,7) korony nie stykają się, ale są rozmieszczone blisko siebie;
- zwarcie przerywane (0,6-0,5), między koronami istnieją miejscami przerwy, w których mogłyby pomieścić się korony pojedynczych drzew,
- zwarcie luźne (0,4), korony są od siebie znacznie oddalone, mogą zetknąć się w przyszłości, w przerwach mogłyby pomieścić się korony kilku drzew,
- brak zwarcia (0,3 i poniżej), gdy drzewa rosną zbyt daleko od siebie aby mogły na siebie wpływać.

Aby stworzyć mapę pokrycia terenu koronami czyli mapę opisującą zwarcie poziome drzew niezbędne było przekształcenie opisu słownego na konkretne wartości. Jest to pewnego rodzaju przybliżenie, ale tylko w ten sposób można było takie dane pozyskać. Korzystając z arkusza kalkulacyjnego „Calc” z pakietu Open Office, za pomocą którego można bez problemu otwierać i edytować plik wydz_pol.dbf, utworzono w tabeli atrybutów warstwy wydz_pol dodatkową kolumnę o nazwie CANOPY. Na podstawie istniejącej kolumny GP_ZWARCIE wypełniono ją wartościami procentowymi korzystając z instrukcji warunkowej „JEŻELI” oraz stosując następujące kryterium zamiany:

- a. zwarcie pełne – 95%;
- b. zwarcie umiarkowane – 75%;
- c. zwarcie przerywane – 55%;
- d. zwarcie luźne – 40%;
- e. brak zwarcia - 0%;

Wczytując warstwę wydzielenia wydz_pol.shp ze zmodyfikowaną tabelą atrybutów do programu GRASS wygenerowano mapy pokrycia koronami (*canopy cover*) niezbędne do poprawnej symulacji pożaru lasu w programie FARSITE.

Na rysunku 5 przedstawiono wygenerowaną wyżej opisaną metodą mapę pokrycia analizowanego obszaru leśnego.



Ryc. 5. Mapa pokrycia terenu koronami (*canopy cover*) dla obszaru KOMPLEKS 1.
(Opracowanie własne na podstawie danych RDLP w Białymstoku)

Fig. 5. Canopy cover map for the area KOMPLEKS 1.
(Own study based on data RDLP in Białystok)

6. Podsumowanie

W pracy zaprezentowano model pożaru koron drzew oraz model roznoszenia płonących fragmentów roślinności przez wiatr. Pokazano w jaki sposób można wykorzystać dane otrzymane z Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w symulacji rozwoju pożaru kompleksu leśnego.

Zaprezentowane modele są częściowo empiryczne. Zakłada się w nich, że paliwa powierzchni są jednorodne, ciągłe i przylegające do gruntu. Paliwa koron są traktowane jako jednorodna warstwa umiejscowiona na jednolitej wysokości od podłoża, posiadająca określoną głębokość i gęstość. W rozważanych modelach nie są brane w wyraźny sposób pod uwagę różne mechanizmy przenikania ciepła takie jak np. promieniowanie, konwekcja lub przewodzenie. Brak również analizy przejściowego zachowania się ognia. W modelach paliwowych używane są jako dane wejściowe do systemu zestawu parametrów opisujących jednorodne siedliska paliwowe (np. iloraz obszaru powierzchni do objętości, stałą ciepła paliwa, itp.).

Założenie jednorodnej warstwy korony drzew jest więc centralnym elementem współczesnych modeli do przewidywania zachowania się ognia korony. W rzeczywistości nigdy nie mamy do czynienia z jednorodną i ciągłą roślinnością. Założenia leżące u podstaw

zaprezentowanych modeli mogą być uzasadnione jedynie dla gęstych lasów składających się z drzew bardzo podobnych pod względem wieku i rozmiaru. Budzi natomiast poważne wątpliwości rozpatrywanie siedlisk o zmiennej gęstości drzew [17]. W ostatnich latach wykrył się podejście krytyczne w stosunku do modelu Van Wagnera. Przeprowadzone badania wskazują na dużą wrażliwość reakcji ognia nawet na małą w skali przestrzennej zmienność paliwa takie jaką zmiana wielkości, kształtu, orientacji cząsteczek oraz odległość między nimi [18]. Pojawiły się nowe modele bazujące na numerycznej mechanice płynów (*Computational Fluid Dynamics – CFD*), w których zakłada się niejednorodność paliwa koron drzew. Modele te są trójwymiarowe i jedynym ich potencjalnym ograniczeniem oraz zastosowaniem w realnych obliczeniach symulacyjnych jest brak odpowiednich trójwymiarowych danych paliwowych [18].

Autorzy artykułu dziękują kierownictwu Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Białymstoku oraz pracownikom tej instytucji, a w szczególności mgr. inż. Pawłowi Chojnowskiemu i mgr. inż. Marcinowi Sołoguba za udostępnienie danych niezbędnych do realizacji pracy oraz fachową pomoc.

W dodatku A przedstawiono wykaz oznaczeń występujących w pracy.

Literatura

1. Czerpak T., Maciak T., *Modelowania pożaru lasu. Część I. Metody i algorytmy modelowania pożaru lasu.*, [w:] Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza, CNBOP 2011, nr 3, str. 83-94;
2. Czerpak T., Maciak T., *Modelowania pożaru lasu. Część II. Symulacja komputerowa pożaru wybranego kompleksu leśnego*, [w:] Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza, CNBOP 2011, nr 4, str. 99-111;
3. Finney M.A. *FARSITE technical documentation. FARSITE 4.0 help*, [online], [dostęp: 10 kwietnia 2012]. Dostępny w World Wide Web: <http://www-laep.ced.berkeley.edu/~itr/literature/farsite/index.html> ;
4. Rothermel R.C., *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. U.S.*, Department of Agriculture Forest Service 1972, INT-115, str. 3-25;
5. Van Wagner C.E., *Conditions for the start and spread of crownfire*, [w:] Canadian Journal of Forest Research 1977, vol. 7, nr 1, str. 23-34;
6. Rothermel R.C., *Predicting behavior and size of crown fires in the northern Rocky Mountains*. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station 1991, INT-438;
7. Albini F.A., *Spot fire distance from burning trees—a predictive model*. Ogden, UT: Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station 1979, INT-56;
8. Richards G.D., *An elliptical growth model of forest fire fronts and its numerical solution*, [w:] International Journal for Numerical Methods in Engineering 1990. vol. 30, nr. 6, str. 1163-1179;

9. Richards G.D., *The properties of elliptical wildfire growth for time dependent fuel and meteorological conditions*, [w:] Combustion Science and Technology 1993. vol. 92, nr. 1, str. 145-171;
10. Maciak T., *Modelowanie pożaru lasu. Cz. III. Modele paliwowe*, Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza CNBOP, 2012, nr 1, str. 37-48 ;
11. Byram G.M., *Chapter Three, Combustion of Forest Fuels*, [In:] Davis, K.P., Forest Fire, Control and Use. McGraw-Hill, New York 1959;
12. Van Wagner C.E., *Prediction of crown fire behavior in two stands of jack pine*, Canadian Journal of Forest Research 1993, vol. 23, nr 3, str. 442-449;
13. *Forestry Canada Fire Danger Group. Development and structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System.*, Inf. Rep. ST-X-3, 1992;
14. Alexander M.E., *Help with making crown fire hazard assessments*, [In:] Fischer, W.C. and S.F. Arno (compilers), Protecting people and homes from wildfire in the Interior West, USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT-251, 1988, str. 147-156;
15. Albini F.A., Baughman R.G., Estimating windspeeds for predicting wildland fire behavior, USDA For. Serv. Res. Pap. INT-221, 1979;
16. Zwarcie (leśnictwo): [online], [dostęp: 10 kwietnia 2012]. Dostępny w World Wide Web: [http://pl.wikipedia.org/wiki/Zwarcie_\(leśnictwo\)](http://pl.wikipedia.org/wiki/Zwarcie_(leśnictwo)) ;
17. Linn R., Winterkamp J., Colman J., Edminster C., Bailey J., *Modeling interactions between fire and atmosphere in discrete element fuel beds*, International Journal of Wildland Fire 2005, vol.14, nr 1, str. 37-48;
18. Parsons R., Mellb W., McCauley P., *Linking 3D spatial models of fuels and fire: Effects of spatial heterogeneity on fire behavior*, Ecological Modelling 2011, vol. 222, nr 3, str. 679-691.

Dodatek A

Wykaz oznaczeń występujących w pracy:

- ρ_a – gęstość powietrza;
- ρ_s – gęstość zwęglonego drewna;
- σ – iloraz powierzchni i objętości warstwy paliwowej;
- v_0 – prędkość końcowa płonącej cząstki;
- CBH – wysokość podstawy korony;
- CBD – gęstość średnia korony;
- CFB – ułamek spalonych koron;
- CD – współczynnik oporu cylindrycznej cząstki;
- E – aktualny strumień energii;
- E_0 – krytyczny strumień energii;
- E_i – ułamek współczynnika rozprzestrzeniania przodu pożaru korony;
- D_p – średnica cząstki;
- I_b – intensywność linii ognia
- I_0 – krytyczna intensywność niezbędna do inicjacji ognia korony;
- I_c – intensywność linii ognia korony;
- H – wysokość korony;
- M – współczynnik wilgotności liści korony;
- R – współczynnik rozprzestrzeniania pożaru paliw powierzchni;
- RAC – krytyczny współczynnik rozprzestrzeniania pożaru koron dla aktywnego pożaru;
- $R_{cactual}$ – aktualny współczynnik rozprzestrzeniania się aktywnego pożaru koron;
- R_{Cmax} – maksymalny współczynnik rozprzestrzeniania się pożaru koron;
- R_0 – krytyczny współczynnik rozprzestrzeniania się pożaru powierzchni;

U – prędkość wiatru na wysokości H ;
 a_x, b_x - stałe;
 h – wydajność cieplna paliwa;
 g – współczynnik przyspieszenia ziemskiego;
 $t_f, t_b, t_0, t_1, t_2, t_3$ – odpowiednie czasy unoszenia płonącej cząstki;
 w – waga paliwa liczona na jednostkę powierzchni;
 w_F – prędkość płomienia gazowego;
 z - wysokość cząsteczki;
 z_F - wysokość płomienia;
 z_0 – długość tarcia;

Dr hab. inż. Tadeusz Maciak, prof. SGSP urodził się 1949 roku w Warszawie. Studia na Wydziale Elektroniki Politechniki Warszawskiej ukończył w roku 1973. Po studiach rozpoczął pracę w Instytucie Technologii Elektronowej Politechniki Warszawskiej (obecnie Instytut Mikro i Optoelektroniki). Zajmował się problemami związanymi z optoelektroniką. Pracę doktorską obronił na Wydziale Elektroniki Politechniki Warszawskiej w roku 1982. W roku 1991 rozpoczął pracę na Wydziale Informatyki Politechniki Białostockiej. W roku 1994 obronił pracę habilitacyjną na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. W roku 1998 równolegle podjął pracę w Szkole Głównej Służby Pożarnej w Warszawie. W latach 2001-2006 Dziekan specjalności „Systemy Informatyczne w Technice i Zarządzaniu” w Wyższej Szkole Ekonomiczno-Technicznej w Legionowie. W ostatnich latach jego zainteresowania koncentrują się na wykorzystaniu aparatu informatycznego w rozwiązywaniu zagadnień związanych z ogólnie pojętym bezpieczeństwem wewnątrz państwa. Prowadzi prace związane z problematyką procesu wspomaganego podejmowania decyzji w Państwowej Straży Pożarnej. W kręgu jego zainteresowań znajdują się również wszelkiego typu symulacje komputerowe zagrożeń pożarowych oraz problematyka ewakuacji ludności z zagrożonych obiektów.

Mgr inż. Tomasz Czerpak urodził się w 1987 roku w Białymstoku. W roku 2005, po skończeniu IV Liceum Ogólnokształcącego, rozpoczął studia na Wydziale Informatyki Politechniki Białostockiej na specjalności Inżynieria Oprogramowania. Studia ukończył 2010 roku. Obecnie pracuje w firmie komputerowej T-MATIC Grupa Computer Plus Sp. z o. o.

Recenzenci

Prof. dr hab. inż. Andrzej Teodorczyk

Prof. dr hab. inż. Mirosław Kosiorek