

mgr inż. **Tomasz CZERPAK**

dr hab. inż. **Tadeusz MACIAK**

Wydział Informatyki

Politechnika Białostocka

## **MODELOWANIA POŻARU LASU. CZĘŚĆ I. METODY I ALGORYTMY MODELOWANIA POŻARU LASU**

### **Forest fire modeling. Part I. Methods and algorithms for forest fire modeling.**

#### **Streszczenie**

W pracy opisano modele matematyczne, które są stosowane do symulacji rozwoju pożaru lasu w oprogramowaniu FARSITE. Zaprezentowano modele pożaru powierzchni roślinności. Zwrócono uwagę na model pożaru koron drzew, zjawisko roznoszenia płonących fragmentów roślinności oraz modele paliwowe. Omówiono również zastosowanie zasady propagacji fali Huygensa do symulacji wzrostu frontu pożaru.

#### **Summary**

Mathematical models which are used to simulate development forest fire in software FARSITE were described in the work. Surface fire spread models were presented. Attention was paid to model crown fire, the phenomenon of spreading the burning fragments of vegetation and fuel models. Were also discussed the use of Huygens' principle for simulating surface front fire growth.

**Słowa kluczowe:** modele pożaru lasu, symulacja rozwoju pożaru lasu;

**Keywords:** forest fire modeling, forest fire simulation;

## **1. Wstęp**

Pożar lasu jest zjawiskiem bardzo niebezpiecznym i niszczycielskim. W miesiącach letnich, w okresie suszy dochodzi do wielu pożarów, które zawsze powodują bardzo duże szkody. Trudno jest określić w jakim kierunku lub z jaką siłą będzie przemieszczał się front pożaru lasu. Szereg skomplikowanych procesów jakie zachodzą w trakcie pożaru praktycznie uniemożliwia precyzyjne przewidywanie rozprzestrzeniania się ognia. W obecnej chwili,

dysponujemy już narzędziami, które potrafią pomóc człowiekowi w przewidywaniu zachowania tego typu zjawisk. Możliwe jest stworzenie w miarę wiarygodnej cyfrowej symulacji pożaru roślinności na danym terenie.

Od wielu lat liderem w badaniach nad modelowaniem i symulacją pożarów lasu są Stany Zjednoczone. Kraj ten praktycznie co roku boryka się z ogromnymi pożarami lasów, których efektem są olbrzymie straty. Stąd też od kilkudziesięciu lat w USA pracuje się nad sposobami modelowania i symulacji pożaru lasu w celu ograniczenia strat, oraz opracowywania jak najdokładniejszych strategii walki z żywiołem. Przy Ministerstwie Rolnictwa Stanów Zjednoczonych znajduje się Urząd Leśny (*Forest Service*), w którym prowadzi się aktywne badania zjawiska pożaru roślinności oraz tworzy się narzędzia służące do modelowania i symulacji rozwoju pożarów lasów. Dotychczas w Polsce nie powstał jeszcze żaden ogólnodostępny model, który pozwalałby na symulację pożaru w czasie rzeczywistym.

W artykule przedstawiono wybrane modele pożaru lasu oraz zaprezentowano oprogramowanie służące do modelowania rozwoju pożarów. Zwrócono uwagę na możliwości wykorzystania dostępnego bezpłatnego oprogramowania. W części badawczej (część II pracy) do przetwarzania danych geoprzestrzennych użyto programu GRASS, natomiast symulacja pożaru lasu została wykonana w wykorzystywanym przez Urząd Leśny Ministerstwa Rolnictwa USA programie FARSITE. Część II obejmuje przykładową symulację rozprzestrzeniania się pożaru roślinności w kompleksie leśnym w pobliżu Nowogrodu. Zostanie ona zaprezentowana w kolejnym numerze kwartalnika CNOBOP.

Modeli i ujęć tematu pożaru lasu jest w literaturze bardzo wiele, natomiast w pracy opisano tylko te, które są stosowane do symulacji pożaru lasu w programie FARSITE. W rozdziale 2 opisano model pożaru pokrywy gleby. Podczas pożaru lasu to właśnie podłoże pali się najczęściej. Kolejny rozdział 3 opisuje problematykę tworzenia modeli paliw powierzchni. Rozdział 4 zawiera opis zjawiska pożaru w koronach drzew oraz jego rozprzestrzenianie, natomiast rozdział 6 opisuje zjawisko przenoszenia ognia przez płonące fragmenty roślin. Rozdział 7 pracy przedstawia zastosowanie zasady propagacji fali Huygensa w modelowaniu kształtu pożaru.

## 2. Modelowanie pożarów powierzchniowych

Pożar w przestrzeni paliw przypowierzchniowych jest najczęściej spotykaną formą pożaru lasu w Polsce. Ogranicza się do pożaru dolnej części lasu, tj. pokrywy gleby. Jest to podstawowy element każdego pożaru kompleksu leśnego.

### 2.1. Szybkość przemieszczania się linii pożaru

Model rozprzestrzeniania się linii frontu pożaru został opracowany na podstawie analizy Frandsena [1]. Zastosował on zasadę zachowania energii do jednostki objętości paliwa na czole ognia postępującego pożaru zwartej warstwy paliwa. Zgodnie z jego analizą szybkości przemieszczania się czoła linii pożaru  $R$  (*Rate of spread*) może być określona poprzez następujące równanie:

$$R = \frac{I_{xig} + \int_{-\infty}^0 \left( \frac{\partial I_z}{\partial z} \right)_{z_c} dx}{\rho_{be} Q_{ig}} \quad (1)$$

gdzie:

$R$  – szybkość przemieszczania się linii pożaru (stopa/min lub m/min),

$I_{xig}$  – poziomy strumień ciepła pochłanianego przez jednostkę objętości paliwa w czasie zapłonu,

$\rho_{be}$  – skuteczna gęstość paliwa (ilość paliwa w jednostce objętości warstwy paliwa przed czołem rosnącego pożaru),

$Q_{ig}$  – ciepło przed zapłonem,

$\left( \frac{\partial I_z}{\partial z} \right)_{z_c}$  – gradient pionowej intensywności strumienia ciepła określony na płaszczyźnie stałej głębokości warstwy paliwowej,

$x$  i  $z$  określają odpowiednio poziome i pionowe współrzędne.

Równanie (1) opisuje szybkość przemieszczania się linii pożaru  $R$ , gdzie pozornie stały stan jest ilorazem strumienia ciepła pozyskanego ze źródła zawartym w liczniku równania i ciepła potrzebnego do zapłonu potencjalnego paliwa opisanym w mianowniku. Równanie to w przedstawionej postaci nie daje się rozwiązać w sposób analityczny. Możliwe jest jedynie wyznaczenie przybliżonego rozwiązania z wykorzystaniem danych eksperymentalnych.

## 2.2. Parametry wykorzystywane do obliczania szybkości przemieszczania się linii pożaru $R$

Do obliczenia szybkości przemieszczania się linii pożaru  $R$  potrzebne jest określenie kilku niezbędnych parametrów występujących w tymże równaniu. Wzory opisujące te parametry zostały przytoczone poniżej zgodnie z analizą przeprowadzoną przez Rothermela [2].

### 2.2.1. Ciepło przed zapłonowe

Ciepło przed zapłonowe paliwa  $Q_{ig}$  zależy od następujących czynników:

- temperatury zapłonu,
- zawartości wilgoci w paliwie,
- ilości paliwa zaangażowanej w procesie zapłonu.

Energia w przeliczeniu na jednostkę masy potrzebna do zapłonu to inaczej ciepło przed zapłonem:

$$Q_{ig} = f(M_f, T_{ig}) \quad (2)$$

gdzie:

$M_f$  – współczynnik wilgotności paliwa,

$T_{ig}$  – temperatura zapłonu.

Ilość paliwa zaangażowana w procesie zapłonu jest określana jako efektywna gęstość  $\rho_{be}$ . Efektywna ilość ciepła  $\epsilon$  jest określona jako iloraz efektywna gęstości  $\rho_{be}$  i rzeczywistej gęstości paliwa  $\rho_b$ :

$$\epsilon = \frac{\rho_{be}}{\rho_b} \quad (3)$$

Efektywna ilość ciepła  $\epsilon$  jest bezwymiarową liczbą, która będzie oscylować blisko jedności dla „dobrych paliw” i będzie spadać do zera w miarę wzrostu rozmiaru paliwa.

$$\rho_{be} = f(\text{gęstość paliwa, rozmiar paliwa}) \quad (4)$$

### 2.2.2. Rozchodzący się strumień ciepła

Licznik równania (1) opisuje rozchodzący się strumień ciepła. Jest on oznaczany jako  $I_p$  oraz wyrażony w jednostkach ciepła na jednostkę powierzchni i jednostkę czasu.

$$I_p = I_{xig} + \int_{-\infty}^0 \left( \frac{\partial I_z}{\partial z} \right)_{z_c} dx \quad (5)$$

Strumień ciepła składa się z dwóch komponentów, poziomego strumienia i gradientu pionowego strumienia całkowanego od minus nieskończoności do 0. Pionowy strumień ma większe znaczenie podczas wspomaganych przez wiatr i rosnących pożarów, ponieważ płomień przechyla się na potencjalne paliwo, powodując wzrost promieniowania, niemniej kontakt ognia i transfer ciepła konwekcyjnego w kierunku potencjalnego paliwa wpływają znacznie bardziej na rozwój płomieni. Gdy nie ma wiatru pionowy strumień jest nieduży i można przyjąć  $I_p = (I_p)_0$ . W modelu tym  $(I_p)_0$  jest podstawowym elementem strumienia ciepła, z którym powiązane są wszystkie dodatkowe czynniki mające wpływ na płomień takie jak wiatr i nachylenie.

$$(I_p)_0 = R_0 \rho_b \epsilon Q_{ig} \quad (6)$$

Równanie (6) pozwala, aby  $(I_p)_0$  było wyznaczane za pomocą eksperymentów z rozprzestrzeniania się pożaru w bezwietrznych warunkach poprzez pomiar  $R_0$  w szerokim zakresie warunków paliwowych. Należy też zauważyć, że strumień ciepła występuje na czole pożaru, dlatego też  $(I_p)_0$  powinno być ściśle związane z intensywnością frontu pożaru.

### 2.2.3. Intensywność reakcji

Intensywność wydzielania energii na froncie pożaru jest powodowana przez płonące gazy powstałe z materii organicznej zawartej w paliwach. Dlatego też tempo zmian materii organicznej z postaci stałej w gazową jest dobrym przybliżeniem kolejnych intensywności wydzielania ciepła przez pożar. Intensywność wydzielania ciepła na jednostkę powierzchni frontu pożaru nazywa się intensywnością reakcji  $I_R$  i definiuje się w sposób następujący [2]:

$$I_R = \frac{-dw}{dt} h \quad (7)$$

gdzie:

$dw/dt$  – wskaźnik utraty masy na jednostkę powierzchni frontu pożaru,

$h$  – ciepło właściwe paliwa.

Intensywność reakcji jest funkcją kilku parametrów takich jak: wielkość cząstki paliwa, jej gęstość oraz wilgotność i skład chemiczny. Intensywność reakcji jest źródłem

strumienia ciepła dla warunków bezwietrznych  $(I_p)_0$ . Ważne jest to, że  $(I_p)_0$  oraz  $I_R$  mogą być oceniane jako zmienne niezależne lub skorelowane.  $(I_p)_0$  może być określone z intensywności reakcji, a ta z kolei uzależniona jest od parametrów paliwa pozyskanych z warstwy paliwowej.

$$(I_p)_0 = f(I_R) \quad (8)$$

#### 2.2.4. Wpływ wiatru i nachylenia terenu

Wiatr i nachylenie stoku zmieniają rozprzestrzenianie się strumienia ciepła poprzez wystawianie potencjalnego paliwa na dodatkowe ciepło konwekcyjne i ciepło promieniowania.  $\Phi_w$  i  $\Phi_s$  reprezentują dodatkowy strumień ciepła tworzony przez wiatr i nachylenie terenu. Są one bezwymiarowymi współczynnikami będącymi funkcją wiatru, nachylenia i parametrów paliwa i muszą być pozyskiwane z danych eksperymentalnych. Całkowity strumień ciepła jest wyrażony równaniem [2]:

$$I_p = (I_p)_0 (1 + \Phi_w + \Phi_s) \quad (9)$$

gdzie:

- $\Phi_w$  – współczynnik wiatru,
- $\Phi_s$  – współczynnik nachylenia.

Po wstawieniu odpowiednich relacji do (1), przybliżone równanie na szybkość przemieszczania się linii pożaru  $R$  przybierze następującą formę:

$$R = \frac{(I_p)_0 (1 + \Phi_w + \Phi_s)}{\rho_b \epsilon Q_{ig}} \quad (10)$$

gdzie:

- $\rho_b$  – gęstość drewna całkowicie suchego,
- $\epsilon$  – efektywność ogrzewania,
- $Q_{ig}$  – ciepło przed zapłonem.

#### 2.2.5. Ciepło przed zapłonem

Przed obliczeniem wartości strumienia ciepła trzeba określić dwa podstawowe warunki: ciepło przed zapłonem oraz efektywną gęstość średnią strumienia ciepła. Ciepło

przed zapłonem dla paliw celulozowych jest liczone analitycznie na podstawie zmian ciepła właściwego z otoczenia, temperatury zapłonu oraz utajonego ciepła wyparowania wilgoci.

Ciepło przed zapłonem opisuje następujące równanie [2]:

$$Q_{ig} = C_{pd} \Delta T_{ig} + M_f (C_{pw} \Delta T_B + V) \quad (11)$$

gdzie:

$C_{pd}$  – ciepło właściwe suchego drewna,

$\Delta T_{ig}$  – zakres temperatur zapłonu,

$M_f$  – wilgotność paliwa,

$C_{pw}$  – ciepło właściwe wody,

$\Delta T_b$  – zakres temperatur wrzenia,

$V$  – utajone ciepło parowania.

Zgodnie z [1] zakłada się, że zakres temperatur zapłonu to 20<sup>0</sup>– 320<sup>0</sup>C, temperatura wrzenia ma wartość 100<sup>0</sup>C, co po przeliczeniach daje równanie w postaci:

$$Q_{ig} = 250 + 1,116 M_f \quad (12)$$

Wilgotność paliwa jest w obliczaniu  $Q_{ig}$  podstawową niezależną zmienną, jednak zaleca się aby dodatkowe parametry takie jak: stopień ogrzewania czy zanieczyszczenia nieorganiczne były wykorzystane w jej obliczaniu.

#### 2.2.6. Efektywna gęstość średnia paliwa

Do wyznaczenia efektywnej gęstości średniej paliwa potrzebne jest określenie efektywności ogrzewania jako funkcji wielkości cząstki paliwa. Dana ta została wyznaczona doświadczalnie poprzez Rothermela [2]:

$$\epsilon = \exp(-138/\sigma) \quad (13)$$

Gdzie  $\sigma$  jest ilorazem powierzchni i objętości cząstki paliwa.

#### 2.2.7. Intensywność reakcji

Najbardziej skomplikowane jest obliczanie intensywności reakcji na podstawie danych o intensywności pożaru i utracie masy paliwa. Podstawą jest tutaj równanie:

$$I_R D = Rh(w_n - w_r) \quad (14)$$

gdzie:

$D$  – głębokość strefy reakcji,

$w_n$  – czysty początkowy ładunek paliwa,

$w_r$  – ilość paliwa pozostała niespalona po przejściu frontu ognia.

Oczywiście początkowy ładunek paliwa jest korygowany ze względu na obecność w paliwie materiałów niepalnych takich jak woda lub składniki mineralne. Czas, w którym front pożaru przemierza dystans równy głębokości strefy reakcji nazywano czasem reakcji i określono następującą zależnością:

$$\tau_R = \frac{D}{R} \quad (15)$$

Podstawiając (15) do równania (14) otrzymuje się zależność:

$$I_R = \frac{h(w_n - w_r)}{\tau_R} \quad (16)$$

Można wywnioskować, że maksymalna intensywność reakcji wystąpi wtedy, gdy po przejściu przez paliwo strefy reakcji całe paliwo ulegnie wypaleniu. Ta maksymalna intensywność reakcji opisana jest przez równanie:

$$I_{Rmax} = \frac{hw_n}{\tau_R} \quad (17)$$

Mając  $I_R$  oraz  $I_{Rmax}$  można określić efektywność strefy reakcji:

$$\eta_\delta = \frac{I_R}{I_{Rmax}} = \frac{(w_n - w_r)}{w_n} \quad (18)$$

W równaniu opisującym  $I_R$  podstawiając w miejsce  $(w_n - w_r)$  przekształcone powyższe równanie (18) otrzymujemy równanie opisujące intensywność reakcji w zależności od wymiernych parametrów paliwa i ognia:

$$I_R = \frac{w_n h \eta_\delta}{\tau_R} \quad (19)$$

Parametr  $w_n$  czyli początkową ilość paliwa oblicza się korzystając z równania:

$$w_n = \frac{w_0}{1 + S_T} \quad (20)$$

gdzie:

$w_0$  – ilość bezwzględnie suchego paliwa,

$S_T$  – zawartość składników mineralnych w paliwie (masa minerałów / masa suchego paliwa).



### 2.2.8. Szybkość reakcji

Szybkość reakcji jest zmienną dynamiczną, która wykazuje stopień zużycia paliwa. Szybkość reakcji  $\Gamma$  ( $\text{min}^{-1}$ ) definiujemy jako iloraz efektywności strefy reakcji liczony w stosunku do czasu przebiegu reakcji:

$$\Gamma = \frac{\eta_{\delta}}{\tau_R} \quad (21)$$

Zasadniczy wpływ ma szybkość reakcji mają cztery podstawowe parametry paliwa: zawartość wilgoci, zawartość składników mineralnych, rozmiar cząstki i średnia gęstość warstwy paliwa. Wilgotność paliwa i zawartość składników mineralnych jest wprowadzona za pomocą dwóch współczynników tłumienia, które wpływają na potencjalną prędkość reakcji. Zmienna ta określa idealną prędkość reakcji w przypadku gdyby paliwo było bezwzględnie suche i nie zawierałoby minerałów:

$$\Gamma = \Gamma' \eta_M \eta_S \quad (22)$$

gdzie:

$\Gamma'$  - potencjalna prędkość reakcji ( $\text{min}^{-1}$ )

$\eta_M$  – współczynnik tłumienia wilgoci,

$\eta_S$  – współczynnik tłumienia składników mineralnych.

Obydwa współczynniki tłumienia przyjmują wartości z zakresu od 1 do 0, a obecność wilgoci i składników mineralnych w paliwie redukuje prędkość reakcji. Współczynniki tłumienia zarówno wilgoci jak i minerałów nie dają się policzyć analitycznie i pozyskuje się je eksperymentalnie.

Ostatecznie po odpowiednich podstawieniach otrzymujemy wzór na intensywność reakcji  $I_R$ :

$$I_R = w_n h \Gamma' \eta_M \eta_S \quad (23)$$

### 2.3. Parametry dodatkowe

Jak już wspomniano, parametry dodatkowe mają bezpośredni wpływ na prędkość, a co za tym idzie intensywność reakcji spalania. Skutecznie ograniczają lub przyspieszają tempo rozprzestrzenia pożaru. Do parametrów dodatkowych można zaliczyć współczynnik tłumienia wilgoci oraz współczynnik tłumienia składników mineralnych.

### 2.3.1. Współczynnik tłumienia wilgoci

Współczynnik tłumienia wilgoci  $\eta_M$  definiuje się następująco:

$$\eta_M = \frac{(I_R)}{(I_{Rmax})}, \text{ dla } M_f = 0 \quad (24)$$

Anderson testował eksperymentalnie identyczne warstwy paliwa z igieł sosny żółtej badając szeroki zakres wilgotności na intensywność reakcji spalania [3]. Określał on wilgotność paliwa  $M_x$  przy której pożar nie będzie się rozprzestrzeniał.

Dla paliw ściółki z igieł sosny żółtej,  $M_x \approx 0.30$ , a dla innych martwych paliw może oscylować pomiędzy 0.10 a 0.40. Eksperymenty przeprowadzono także dla warstwy paliwa określanej jako „*logging slash*” czyli wycięty, zniszczony las z przewagą powalonych drzew, która jest bardziej porowata niż ściółka. Dla tej warstwy paliwa  $M_x$  utrzymuje się pomiędzy 0.10 a 0.15.

### 2.3.2. Współczynnik tłumienia składników mineralnych

Współczynnik tłumienia składników mineralnych został określony przez Philpota dla naturalnych paliw poprzez analizę termogravimetryczną [4]. W badaniu tym założono, że znormalizowana szybkość rozkładu będzie taka sama jak znormalizowana intensywność reakcji. Dla maksymalnej szybkości rozkładu zawartość składników mineralnych wynosiła 0.0001 i założono, że jest to najmniejsza zawartość minerałów dla naturalnych paliw. Philpot ustalił, że zawartość krzemionki nie wpływa na szybkość rozkładu paliwa. Równanie określające współczynnik tłumienia składników mineralnych można zapisać w formie:

$$\eta_s = 0,174 (S_e)^{-1.19} \quad (25)$$

Gdzie  $S_e$  jest efektywna zawartością składników mineralnych (wolnych od krzemionki).

### 2.3.3. Fizyczne parametry paliwa

W ocenie intensywności reakcji pozostały dwa czynniki, które należy uwzględnić. Są to zawartość warstwy paliwa i rozmiar cząstki paliwa. Obydwa mają znaczący wpływ na palność paliw. Założono, że najniższa wartość intensywności ognia oraz współczynnika rozprzestrzeniania występują wtedy, gdy zawartość warstwy paliwa jest skrajna, czyli skrajnie luźna lub skrajnie gęsta. W przypadku gęstej warstwy paliwa można to argumentować przede wszystkim słabym dostępem powietrza lub słabym przenikaniem ciepła ponad górną powierzchnię warstwy paliwa. W przypadku warstwy luźnej zasadniczy wpływ na intensywność i współczynnik rozprzestrzeniania mają straty w obiegu ciepła pomiędzy

cząstkami warstwy paliwa spowodowane brakami w tejże warstwie. Dlatego też, pomiędzy tymi skrajnymi zawartościami zakłada się optymalne rozmieszczenie paliw, takie którego spalanie powoduje powstanie największej wartości intensywności spalania lub szybkości reakcji. Oczywiście taki optymalny układ nie będzie taki sam dla różnych wielkości cząstki warstwy paliwa.

Zwartość warstwy paliwa jest określana jako współczynnik upakowania, zdefiniowany jako ułamek objętości warstwy paliwa, która jest zajęta przez konkretne paliwo. Dla ułatwienia współczynnik upakowania może być liczony jako iloraz średniej gęstości warstwy paliwa do gęstości cząstki warstwy paliwa:

$$\beta = \frac{\rho_b}{\rho_p} \tag{26}$$

gdzie:

$\beta$  – współczynnik upakowania,  
 $\rho_b$  – średnia gęstość warstwy paliwa,  
 $\rho_p$  – średnia gęstość cząstki.

Aby określić rozmiar cząstki paliwa potrzebny jest iloraz powierzchni i objętości. Zakładając, że  $\sigma$  stanowi iloraz powierzchni do objętości cząstki paliwa, dla paliw, które są długie w stosunku do szerokości mamy:

$$\sigma = \frac{4}{d} \tag{27}$$

Gdzie  $d$  jest średnicą okrągłych lub długością krawędzi pola przekroju kwadratowych fragmentów paliwa.

### 3. Modele paliwowe

Modelem paliwowym można określić matematyczną reprezentację pewnych parametrów określonego typu roślinności (potencjalnego paliwa), np. pokrywy gleby lasu. Parametry opisane w modelu paliwowym dla danej formacji roślinnej są wykorzystywane np. do obliczania współczynnika rozprzestrzeniania ognia w danym paliwie za pomocą równań modelu Rothermela [2].

### 3.1. Opis popularnych modeli paliwowych

Matematyczne modele zachowania ognia bazują na wielu parametrach paliwa. Matematyczny model zachowania ognia powinien zawierać następujące podstawowe parametry:

- ładunek dla każdej klasy średnicy cząstki paliwa (t/akr lub t/ha)
- współczynnik powierzchni paliwa do objętości dla każdej klasy wielkości (1/ft lub 1/m)
- głębokość warstwy paliwa (ft lub cm)
- ciepło właściwe paliwa (BTU/lb lub kJ/kg)
- wilgotność wygaszenia (%)

Pierwszy zbiór modeli paliwowych wprowadził Rothermel [2]. Opisał on parametry dla 11 paliw: trawa krótka, trawa długa, gęste krzaki i krzewy, gęste zarośla krzewów i małych drzew, trawy i poszycie leśne, ściółka leśna, ściółka leśna razem z gałęziami i martwymi częściami roślin, ściółka lasów liściastych, wyrąbane lub powalone drzewa w 3 formach: tylko pojedyncze powalone, około połowy drzew powalonych lub większość drzewostanu powalona. W swoich modelach utrzymał na stałym poziomie właściwości cząstki paliwa (całkowitą i efektywną zawartość składników mineralnych, ciepło właściwe i gęstość cząstki). Wilgotność wygaszenia została przypisana dla każdego paliwa na poziomie 30%. Poszczególne modele różnią się przede wszystkim załadunkiem paliwa względem klasy wielkości, głębokością warstwy paliwa i rozmiarem cząstki paliwa.

Albini [5] dodał do 11 modeli Rothermela jeszcze 2 inne: martwe krzaki i krzewy oraz południowe poszycie, krzewy leśne. Zbiór 13 modeli Albiniego zastał dokładnie opisany przez Andersena [6].

W roku 1984 Anders, Burgan i Rothermel [7] opracowali pierwszą wersję programu do przewidywania rozprzestrzeniania i modelowania pożaru roślinności. Zmodyfikowano w niewielkim stopniu 13 paliwowy zbiór modeli Andersona wprowadzając parametr ciepła właściwego cząstki jako zmienny, różniący się pomiędzy modelami, a nie tak jak poprzednio stały niezależnie od modelu. Na podstawie tych założeń powstały programy FARSITE [8] i BehavePlus [9].

Oryginalny zbiór 13 modeli paliwowych funkcjonował dobrze przy przewidywaniu rozprzestrzeniania pożaru i intensywności ognia, jedynie w okresie szczytu sezonu pożarowego. Częściowo jest to związane z suchymi warunkami, co prowadzi do powstania bardziej jednolitego kompleksu paliwowego. Modele te mają spore braki w stosunku do

innych przypadków, w modelowaniu pożaru, jego rozwoju czy efektów spalania, oraz przede wszystkim modelowania przeniesienia się ognia z powierzchni na korony drzew i jego rozprzestrzeniania. Powszechne korzystanie z modelu Rothermela i chęć posiadania większej liczby opcji w doborze modelu paliwowego doprowadziły do utworzenia przez Scotta i Burgana [10] nowego zbioru modeli paliwowych. W nowym zbiorze wprowadzono następujące zmiany:

- zwiększono dokładności przewidywania przebiegu pożaru poza sezonem pożarowym,
- zwiększono liczby modeli paliwowych stosowanych dla obszarów o wysokiej wilgotności poprzez modyfikację wilgotności parametru wygaszenia,
- zwiększono liczby modeli dla ściółki leśnej oraz ściółki z trawą lub krzewami,
- przewidziano przeniesienie ognia powierzchni na ogień korony,
- założono wzrost zdolności do symulacji zmian w zachowaniu pożaru m. in. poprzez zaoferowanie znacznie większej liczby modeli paliwowych, zwłaszcza zdominowanych drewnem warstw paliwa.

Warto dodać, że nowy zbiór modeli ma podobnie jak oryginalny 13 paliwowy zbiór zastosowanie do symulacji zachowania pożaru powierzchni tylko na linii frontu ognia i nie obejmuje pozostałości spalania na terenie po przejściu frontu ognia. Parametry modeli zawartych w tym zbiorze nie powinny być używane np. do modelowania ilości spalonego paliwa.

Modele paliwa w omawianym zbiorze są podzielone na typy według zdolności przenoszenia ognia przez paliwo w modelu. Każdy typ paliwa posiada dwu literowy kod. Niepalne paliwa, które nie są oczywiście prawdziwymi paliwami zostały umieszczone w celu łatwego umieszczania na mapie paliwowej potrzebnej do wykonania symulacji również obszarów niepalnych. Typy paliwa zostały uporządkowane podobnie jak w oryginalnym zbiorze 13 modeli, z zastosowaniem typów podwójnych łączonych np. *trawy-krzewy* czyli typ paliwa pomiędzy dwoma typami tutaj między trawami a krzewami. W zbiorze wyróżniono następujące typy paliwa:

- a. (NB) *Nonburnable* – Niepalne
- b. (GR) *Grass* – Trawy
- c. (GS) *Grass-Shrub* – Trawy-Krzewy
- d. (SH) *Shrub* – Krzewy
- e. (TU) *Timber-Understory* – Wysokie drzewa-Podszybie

f. (TL) *Timber Litter* – Wysokie drzewa-Ściółka

Modele paliwowe są numerowane do 256 (8-bitowe numery) tak, aby w łatwy sposób informacje na temat danego modelu paliwowego mogłyby być używane na mapach paliwowych oraz w aplikacjach bazodanowych. Dla każdego typu paliwa został przydzielony blok numerów, co w znaczący sposób ułatwia choćby tworzenie map paliwowych dla określonego terenu, w którym określenie konkretnego modelu paliwa nie jest wymagane. Nie trzeba tworzyć ogromnej skali, gdyż wszystkie numery modeli paliwa w danym bloku mogą być oznaczone tym samym kolorem co w dużym stopniu zwiększa czytelność mapy. Niewykorzystane numery są zarezerwowane dla przyszłych standardowych i niestandardowych modeli paliwowych, co pozwala w przyszłości umieszczać je w konkretnych odpowiednich blokach numerów.

**3.2. Dynamiczne modele paliwowe**

W nowym zbiorze Scotta i Burgana wszystkie modele, które zawierają żywą roślinność trawiastą są tzw. modelami dynamicznymi. W sekcji modeli paliwa opisującej typ modelu paliwa widać, który z nich zawiera roślinność trawiastą, a tym samym jest modelem dynamicznym. Metodę dynamicznego przetwarzania modeli paliwowych opisał Burgan [11]. Sformułował on następujące założenia dla modeli dynamicznych:

- jeśli współczynnik wilgotności roślinności zielnej wynosi 120% lub więcej, paliwa zielne są zielone i cały ładunek tej roślinności pozostaje w klasie żywych paliw zielnych,
- jeśli współczynnik wilgotności roślinności zielnej wynosi 30% lub mniej, paliwa zielne są traktowane jak w pełni przetworzone i cały ładunek zostaje przeniesiony do kategorii martwej,
- jeśli współczynnik wilgotności roślinności zielnej znajduje się pomiędzy 30% a 120%, wtedy część ładunku jest przenoszona do klasy roślinności martwej. Dla przykładu jeśli współczynnik wilgotności wynosi 75% czyli połowa pomiędzy 30% a 120%, wtedy połowa ładunku jest przeniesiona do klasy roślinności martwej, a połowa pozostaje w klasie roślinności żywej.

Ładunek przeniesiony do klasy martwej roślinności jest umieszczony w klasie dla martwych roślin zielnych, czyli klasie o najmniejszej średnicy cząstki paliwa, zachowując

iloraz powierzchni do objętości taki jak w przypadku klasy żywych roślin. W tabeli 1. ujęto parametry modeli paliwowych z nowego zbioru Scotta i Burgana.

Wśród wymienionych parametrów mamy ładunek paliwa względem klasy i części, współczynnik powierzchni paliwa do objętości (SAV – *Surface Area to Volume*) według klasy i części, typ modelu (statyczny lub dynamiczny), głębokość warstwy paliwa, współczynnik wilgoci wygaszenia, ciepło właściwe cząstki paliwa. Ponad to mamy stałe dla każdego modelu i nie wypisane wartości takie jak: SAV dla martwych paliw 10-hr równy 109 1/ft a dla 100-hr równy 30 1/ft, całkowita zawartość minerałów równa 5,55%, a efektywna (wolna od krzemionki) równa 1%, gęstość cząstki całkowicie wysuszonego paliwa równa 32 lb/ft<sup>2</sup>. W pierwszej kolumnie tabeli mamy kod modelu paliwowego. Sekcja kolejnych 5 kolumn określa załadunek. Poszczególne czasy 1-hr, 10-hr, 100-hr oznaczają liczbę godzin i określają tzw. *timelag* czyli liczbę godzin jaką zajmie cząstce paliwa osiągnięcie 63% wilgotności równowagi, przy warunkach środowiska 80<sup>0</sup>F i 20% wilgotności. Dodatkowo stosuje się również klasę 1000-hr dla średnicy cząstki paliwa powyżej 3 cali, ale w tej tabeli nie jest ona uwzględniona. W sekcji kolumn opisujących ładunek paliw mamy jeszcze 2 kolumny określające żywe zielne i drzewne paliwa. Kolejna kolumna określa rodzaj modelu. Warto dodać, że bywają modele opisujące wyłącznie martwe paliwa, a taki model nie może być dynamiczny np. modele TL i SB. Następna sekcja 3 kolumn określa współczynnik powierzchni paliwa odniesiony do objętości. Mamy tu kolumnę określającą SAV dla klasy martwych paliw 1-hr oraz kolumny dla żywych zielnych lub drzewnych paliw. Trzy ostatnie kolumny tabeli opisują głębokość warstwy paliwowej, współczynnik wygaszenia martwego paliwa oraz ciepło właściwe.



Tabela 1.  
Parametry modeli paliwowych zbioru Scotta i Burgana zaczerpnięte z [10].

Fuel model code	Fuel load (t/ac)					Fuel model type <sup>a</sup>	SAV ratio (1/ft) <sup>b</sup>			Fuel bed depth (ft)	Dead fuel extinction moisture (percent)	Heat content BTU/lb <sup>c</sup>
	1-hr	10-hr	100-hr	Live herb	Live woody		Dead 1-hr	Live herb	Live woody			
GR1	0.10	0.00	0.00	0.30	0.00	dynamic	2200	2000	9999	0.4	15	8000
GR2	0.10	0.00	0.00	1.00	0.00	dynamic	2000	1800	9999	1.0	15	8000
GR3	0.10	0.40	0.00	1.50	0.00	dynamic	1500	1300	9999	2.0	30	8000
GR4	0.25	0.00	0.00	1.90	0.00	dynamic	2000	1800	9999	2.0	15	8000
GR5	0.40	0.00	0.00	2.50	0.00	dynamic	1800	1800	9999	1.5	40	8000
GR6	0.10	0.00	0.00	3.40	0.00	dynamic	2200	2000	9999	1.5	40	9000
GR7	1.00	0.00	0.00	5.40	0.00	dynamic	2000	1800	9999	3.0	15	8000
GR8	0.50	1.00	0.00	7.30	0.00	dynamic	1500	1300	9999	4.0	30	8000
GR9	1.00	1.00	0.00	9.00	0.00	dynamic	1800	1600	9999	5.0	40	8000
GS1	0.20	0.00	0.00	0.50	0.65	dynamic	2000	1800	1800	0.9	15	8000
GS2	0.50	0.50	0.00	0.60	1.00	dynamic	2000	1800	1800	1.5	15	8000
GS3	0.30	0.25	0.00	1.45	1.25	dynamic	1800	1600	1600	1.8	40	8000
GS4	1.90	0.30	0.10	3.40	7.10	dynamic	1800	1600	1600	2.1	40	8000
SH1	0.25	0.25	0.00	0.15	1.30	dynamic	2000	1800	1600	1.0	15	8000
SH2	1.35	2.40	0.75	0.00	3.85	N/A	2000	9999	1600	1.0	15	8000
SH3	0.45	3.00	0.00	0.00	6.20	N/A	1600	9999	1400	2.4	40	8000
SH4	0.85	1.15	0.20	0.00	2.55	N/A	2000	1800	1600	3.0	30	8000
SH5	3.60	2.10	0.00	0.00	2.90	N/A	750	9999	1600	6.0	15	8000
SH6	2.90	1.45	0.00	0.00	1.40	N/A	750	9999	1600	2.0	30	8000
SH7	3.50	5.30	2.20	0.00	3.40	N/A	750	9999	1600	6.0	15	8000
SH8	2.05	3.40	0.85	0.00	4.35	N/A	750	9999	1600	3.0	40	8000
SH9	4.50	2.45	0.00	1.55	7.00	dynamic	750	1800	1500	4.4	40	8000
TU1	0.20	0.90	1.50	0.20	0.90	dynamic	2000	1800	1600	0.6	20	8000
TU2	0.95	1.80	1.25	0.00	0.20	N/A	2000	9999	1600	1.0	30	8000
TU3	1.10	0.15	0.25	0.65	1.10	dynamic	1800	1600	1400	1.3	30	8000
TU4	4.50	0.00	0.00	0.00	2.00	N/A	2300	9999	2000	0.5	12	8000
TU5	4.00	4.00	3.00	0.00	3.00	N/A	1500	9999	750	1.0	25	8000
TL1	1.00	2.20	3.60	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	0.2	30	8000
TL2	1.40	2.30	2.20	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	0.2	25	8000
TL3	0.50	2.20	2.80	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	0.3	20	8000
TL4	0.50	1.50	4.20	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	0.4	25	8000
TL5	1.15	2.50	4.40	0.00	0.00	N/A	2000	9999	1600	0.6	25	8000
TL6	2.40	1.20	1.20	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	0.3	25	8000
TL7	0.30	1.40	8.10	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	0.4	25	8000
TL8	5.80	1.40	1.10	0.00	0.00	N/A	1800	9999	9999	0.3	35	8000
TL9	6.65	3.30	4.15	0.00	0.00	N/A	1800	9999	1600	0.6	35	8000
SB1	1.50	3.00	11.00	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	1.0	25	8000
SB2	4.50	4.25	4.00	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	1.0	25	8000
SB3	5.50	2.75	3.00	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	1.2	25	8000
SB4	5.25	3.50	5.25	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	2.7	25	8000

Szersze przedstawienie problematyki modeli paliwowych zawarte jest w III części opracowania dotyczącego modelowania pożarów lasów

#### 4. Pożar koron drzew

Wymienione zjawisko określa pożar koron drzew znajdujących się ponad pożarem paliw powierzchni. Istnieje wiele modeli zarówno inicjacji jak i rozwoju pożaru koron. Model inicjacji ognia korony Van Wagnera [13] 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. Model zakłada, że krytyczna intensywność niezbędna do inicjacji ognia korony  $I_0$  zależy przede wszystkim od współczynnika wilgotności liści  $M$  (który jest określony jako procent suchej palnej masy), oraz wysokości podstawy korony  $CBH$  (*Crown Base Height*) (m)



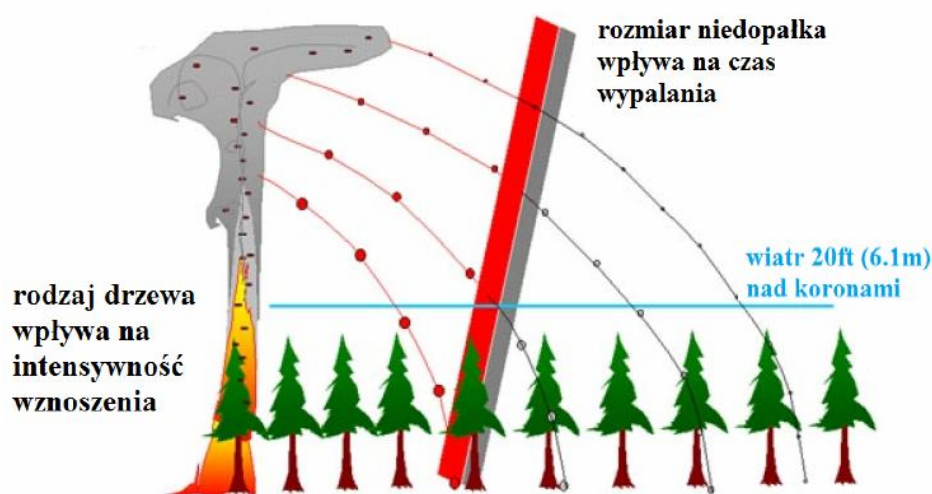
$$I_0 = (0,010 CBH (460 + 25,9 M))^3 \quad (30)$$

Wysokość podstawy korony jest to pionowa odległość pomiędzy powierzchnią ziemi a żywym paliwem korony. W praktyce powinny być jeszcze uwzględnione obecność i wpływ tzw. „drabiny” paliw, czyli martwych gałęzi i małych drzew pomiędzy powierzchnią a koronami, co może skutecznie obniżyć wartość CBH. Inicjacja jakiegось pożaru korony następuje wtedy, gdy intensywność ognia powierzchni dla jakiegось punktu obliczona ze wzoru (30) wynosi lub przekracza  $I_0$ . Sposób rozprzestrzeniania się aktywnego pożaru korony drzew określa model Alexandra [14].

Dokładniejsze potraktowanie problematyki modelowania pożaru koron drzew znajduje się w IV części opracowania.

## 5. Unoszenie płonących fragmentów roślin (*spotting*)

Angielski termin „*spotting*” określa zjawisko polegające na powstawaniu nowych ognisk ognia przed frontem pożaru poprzez noszenie płonących fragmentów roślinności lub żaru przez wiatr. Zjawisko to nieraz ma 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 żagwi o różnych rozmiarach. Jednym z najpopularniejszych modeli opisujących ten problem jest model oparty na równaniach Albiniego [15] opisujących „*spotting*” z płonących drzew. Płonące drzewa są źródłem licznych płonących fragmentów roślinności, które mogą być wyniesione wysoko poprzez wiatr. Zjawisko *spottingu* przedstawia rycina 1.



Ryc. 1. Schemat przenoszenia ognia przez niedopalki według [8].

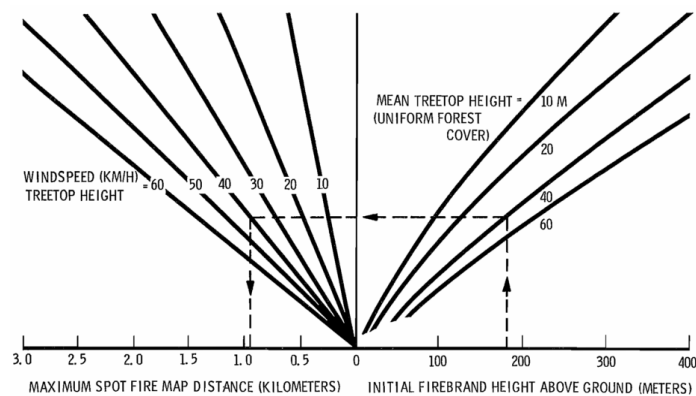
Odległość przenoszenia płonących fragmentów roślinności na nierównym terenie zależy przede wszystkim od wielkości niedopałka, pionowego profilu prędkości wiatru oraz od topografii powierzchni w kierunku przenoszenia niedopałków. Spośród powyższych parametrów bardzo ważny jest rozmiar, gdyż jak łatwo się domyślić większy niedopałek płonie dłużej ale nie zostanie przeniesiony tak daleko jak mniejszy. Model Albiniego pozwala obliczyć wysokość, do której unoszone są płonące cząstki jako wysokość gdzie czas trwania dynamicznego przepływu struktury płonącego drzewa jest równy czasowi potrzebnemu cząstce na podróż w górę od jej źródła.

Ciągle palące się fragmenty drewna, kiedy osiągają grunt mogą rozpaść nowy pożar o ile nie wylądowały w obszarze aktualnego pożaru lub w tzw. enklawie pożarowej czyli powierzchni pokrytej niepalnymi paliwami.

W celu opisania wielu czynników, mających wpływ na zapłon i nie dających się określić ilościowo, mechanicznie lub przestrzennie wprowadzono nieoficjalnie 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.

Na rycinie 2. przedstawiono nomogram pozwalający na określenie maksymalnej odległości w płaskim terenie na którą spadną niedopałki. Nomogram powstał na podstawie modelu matematycznego zjawiska uzupełnionego danymi empirycznymi.

W wielu systemach modelowania pożaru roślinności tak jak w programie FARSITE stosowane są różne klasy wielkości cylindrycznych fragmentów płonącego materiału np. od 1/16 cala do 1 cala.



**Ryc. 2.** Nomogram pozwalający na określenie maksymalnej odległości w płaskim terenie na którą spadną niedopałki. Zaczepnięty z pracy [15].

Ze względu na ograniczone ramy artykułu dokładniejsze potraktowanie problematyki modelowania unoszenia płonących fragmentów roślinności znajduje się w IV części opracowania.

## 6. Zastosowanie zasady Huygensa do modelowania kształtu pożaru

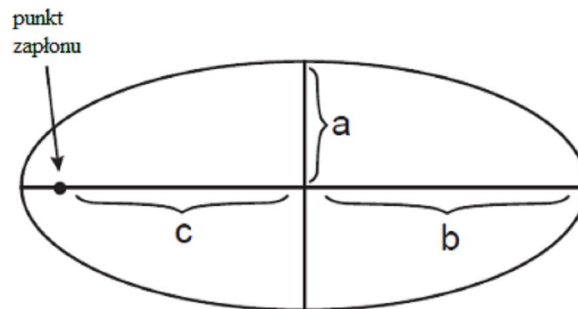
Zastosowanie zasady Huygensa do modelowania kształtu rozrostu pożaru roślinności zostało zaprezentowane przez Richardsa [16,17]. Jego równania różniczkowe opisują rozwój eliptycznej fali frontu pożaru, złożonego z serii wierzchołków, które definiują krawędzie pożaru. Zasada Huygensa zakłada, że każdy wierzchołek może być źródłem nowej eliptycznej ekspansji ognia. Do informacji wymaganych dla każdego wierzchołka zaliczane są następujące dane:

- orientacja wierzchołka na froncie pożaru, w zakresie różnicy komponentów (m)  $x_s$ ,  $y_s$ ,
- kierunek maksymalnego współczynnika rozprzestrzeniania się ognia  $\theta$  (uwzględniając m.in. wiatr, nachylenie itp.),
- kształt pożaru określony na podstawie warunków lokalnych uwzględniając wymiary elipsy a, b, c.

Wykorzystując te informacje jako dane wejściowe do równań Ritchardsa, można obliczyć prostopadłe dyferencjały współczynnika rozprzestrzeniania  $X_t$  i  $Y_t$  dla danego wierzchołka [8]:

$$X_t = \frac{a^2 \cos \theta (x_s \sin \theta + y_s \cos \theta) - b^2 \sin \theta (x_s \cos \theta - y_s \sin \theta)}{(b^2 (x_s \cos \theta + y_s \sin \theta)^2 - a^2 (x_s \sin \theta - y_s \cos \theta)^2)^{1/2}} + c \sin \theta \quad (31)$$

$$Y_t = \frac{-a^2 \sin \theta (x_s \sin \theta + y_s \cos \theta) - b^2 \cos \theta (x_s \cos \theta - y_s \sin \theta)}{(b^2 (x_s \cos \theta + y_s \sin \theta)^2 - a^2 (x_s \sin \theta - y_s \cos \theta)^2)^{1/2}} + c \cos \theta \quad (32)$$



Ryc. 3. Wymiary fali eliptycznej wg. [8]

### 6.1. Transformacje dla pochylego terenu

Równania Richardsa w pierwotnej wersji miały zastosowanie tylko do płaskiego terenu. Na płaskim terenie poziomy układ współrzędnych pozostaje bez zmian w rzucie na powierzchnię ziemi. Natomiast podstawą prawidłowego zastosowania modelu dla niepłaskich powierzchni jest swobodna konwersja pomiędzy płaszczyzną poziomą a płaszczyzną powierzchni. Parametry  $x_s$  oraz  $y_s$  opisujące kierunek normalnej do frontu pożaru dla każdego wierzchołka, są transformowane ze swoich pierwotnych poziomych wartości poprzez dodanie lub odjęcie współczynnika korekcji nachylenia  $D_i(m)$ , zależnego od ekspozycji  $\omega$ (radiany) i-tego wierzchołka:

$$x_s = (x_{i-1} - x_{i+1}) \pm D_i \sin \omega_i \quad (33)$$

$$y_s = (y_{i-1} - y_{i+1}) \pm D_i \cos \omega_i \quad (34)$$

gdzie  $D_i$  jest różnicą między dystansem mierzonym na poziomej i lokalnie nachylonej płaszczyźnie dla obwodu segmentu  $(x_i^{-1}, y_i^{-1}) - (x_i^{+1}, y_i^{+1})$ , dla i-tego wierzchołka w kierunku ekspozycji.

### 6.2. Wektor wiatru i nachylenia

Wektor wynikowy wiatru można obliczyć dla pożaru powierzchni z wykorzystaniem bezwymiarowych współczynników dla prędkości wiatru w połowie wysokości płomieni  $\Phi_w$  oraz nachylenia  $\Phi_s$  zgodnie z równaniami Rothermela opisującymi rozprzestrzenianie się pożarów przypowierzchniowych:

$$\Phi_s = 5.275 \beta^{-0.3} \tan \phi^2 \quad (35)$$

$$\Phi_w = C (3.281U)^B \left( \frac{\beta}{\beta_{op}} \right)^{-E} \quad (36)$$

gdzie  $\beta$  określa współczynnik upakowania warstwy paliwa a  $\phi$  nachylenie (radiany),  $U$  to prędkość wiatru w połowie wysokości płomieni ( $m s^{-1}$ ), a współczynniki  $C$ ,  $B$  i  $E$  są funkcjami rozmiaru cząstki paliwa w warstwie paliwowej.

### 6.3. Wymiary eliptyczne

Wymiary  $a$ ,  $b$ ,  $c$  niezbędne do obliczenia  $X_t$  i  $Y_t$  opisują kształt eliptyczny pożaru powiązanego z konkretnym wierzchołkiem. Alexander [18] stwierdził, że efekt wpływu

wiatru i nachylenia na kształt pożaru jest proporcjonalny do efektu oddziaływania tych czynników na współczynnik rozprzestrzeniania frontu pożaru. Założenie to nie zostało nigdy zweryfikowane, a kształt pożaru jest określany jedynie empirycznie z uwzględnieniem mierzonych prędkości wiatru. Dlatego w obecnym modelu kształt ognia oblicza się dla każdego wierzchołka z wykorzystaniem efektywnej prędkości wiatru w połowie wysokości płomieni. Jest to tzw. wirtualna prędkość wiatru, która powstaje z uwzględnienia wpływu nachylenia i wiatru na współczynnik rozprzestrzeniania pożaru.

Wymiary eliptycznego kształtu pożaru były przedmiotem licznych badań z wykorzystaniem różnych sformułowań empirycznych. Sformułowania te posiadają różne formy i generują różne kształty pożaru dla takiej samej prędkości wiatru. Jednym z popularniejszych sformułowań problemu kształtu elipsoidy jest zależność odkryta przez Andersona [19] użyta do określenia ilorazu długości do szerokości (LB) przy założeniu, że pożar rośnie w kształcie pojedynczej elipsy zgodnie z założeniami modelu Alexandra [18]:

$$LB = 0.936e^{(0.2566U)} + 0.461e^{(-0.1548U)} - 0.397 \quad (37)$$

Oryginalne równanie Andersona [23] zostało zmodyfikowane poprzez odjęcie stałej 0,397 od LB. Było to niezbędne aby LB było równe 1,0 dla płaskiego terenu i bezwietrznych warunków. Zakładając, że tylne ognisko elipsy jest również źródłem rozprzestrzeniania pożaru można wyprowadzić zależność dla współczynnika kształtu przodu i tyłu elipsy [8]:

$$HB = (LB + (LB^2 - 1)^{0.5}) / (LB - (LB^2 - 1)^{0.5}) \quad (38)$$

Z pomocą wzoru (38) można obliczyć wymiary osi elipsy a, b i c, wykorzystując do tego również współczynniki rozprzestrzeniania się pożaru zarówno powierzchni jak i koron:

$$a = 0.5(R + R/HB)/(LB) \quad (39)$$

$$b = (R + R/HB)/2.0 \quad (40)$$

$$c = b - R/HB \quad (41)$$

## 7. Podsumowanie

W pracy przedstawiono modele matematyczne, które są stosowane do symulacji rozwoju pożaru lasów w stosowanym w USA bezpłatnym oprogramowaniu FARSITE. FARSITE wykorzystuje opisane w pracy modele, przede wszystkim model pożaru powierzchni Rothermela [2], pożar koron drzew Van Wagnera [13] i Rothermela [16] oraz

model roznoszenia płonących fragmentów roślinności Albiniego [18]. Podstawą implementacji programu jest również zastosowanie konkretnego ujęcia zasady propagacji fali Huygensa do symulacji wzrostu frontu pożaru. FARSITE jest programem zgodnym z Systemem Informacji Geograficznej (GIS - *Geographical Information System*).

Obok właściwego modelu matematycznego do przeprowadzenia symulacji konkretnego pożaru lasu potrzebne są dane przestrzenne określające topografię terenu, rozmieszczenie paliw roślinnych oraz charakterystyka koron drzew kompleksu leśnego. Dodatkowo konieczne jest wczytanie danych opisujących pogodę, wilgotność i wiatry występujące w danym momencie. Wszystkie wczytane warstwy tworzą środowisko, w którym przeprowadzana jest symulacja pożaru.

W kolejnych publikacjach CNOBOP zostaną przedstawione wyniki przeprowadzonej za pomocą oprogramowania FARSITE symulacji pożaru dla wybranego kompleksu leśnego położonego koło Nowogrodu, problematyka tworzenia modeli paliwowych oraz opis modeli rozprzestrzeniania się ognia koron drzew [20,21,22].

W dodatku A przedstawiono wykaz ważniejszych oznaczeń występujący w pracy. Dodatek B zawiera spis jednostek, którymi posługiwano się w pracy.

## Literatura

1. Frandsen W. H., *Fire spread through porous fuels from the conservation of energy*, Combustion and Flame 1971, vol. 1, nr. 16, str. 9-16;
2. 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;
3. Anderson H. E., *Heat transfer and fire spread*, U.S. Department of Agriculture Forest Service 1969, INT-69, str. 1-20;
4. Philpot C.W., *Mineral content and pyrolysis of selected plant materials*, U.S. Department of Agriculture Forest Service 1968 INT-84, str. 1-4;
5. Albini F.A., *Estimating wildfire behavior and effects*, U.S. Department of Agriculture Forest Service 1976, General Technical Report INT-30;
6. Anderson H.E., *Aids to determining fuel models for estimating fire behavior*, U.S. Department of Agriculture Forest Service 1982, General Technical Report INT-122;



7. Burgan R.E., Rothermel R.C., *BEHAVE: Fire behavior prediction and fuel modeling system - FUEL subsystem*, U.S. Department of Agriculture Forest Service 1984, General Technical Report INT-167;
8. Finney M.A., *FARSITE: Fire Area Simulator—model development and evaluation*, U.S. Department of Agriculture Forest Service 2004;
9. Andrews P. L., Bevins C. D., Seli R. C., *BehavePlus fire modeling system, version 4.0: User's Guide. General Technical Report, RMRS-GTR-106WWW Revised. Ogden, UT: Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station 2008;*
10. Scott J. H., Burgan R. E., *Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153. Fort Collins, CO, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station 2005;*
11. Burgan R. E., *Estimating live fuel moisture for the 1978 national fire danger rating system*, Research Paper INT-226. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service 1979, Intermountain Forest and Range Experiment Station;
12. Byram G.M., Chapter Three, *Combustion of Forest Fuels*, [in] Davis, .K.P., *Forest Fire: Control and Use*. McGraw-Hill. New York 1959 Wyd. 1. Rozdz. 3 str. 61-123
13. Van Wagner C.E., *Conditions for the start and spread of crownfire*, Canadian Journal of Forest Research, 1977, vol. 7 str. 23-34;
14. Alexander M.E., *Help with making crown fire hazard assessments*, [w:] Fischer, W.C. *Protecting people and homes from wildfire in the Interior West*. Ogden, UT: Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range 93 Experiment Station 1988, General Technical Report INT-251;
15. Albini F. A., *Spot fire distance from burning trees – a predictive model*, General Technical Report INT-56. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service 1979, Intermountain Forest and Range Experiment Station;
16. Richards G.D., *An elliptical growth model of forest fire fronts and its numerical solution*, International Journal for Numerical Methods in Engineering 1990. vol. 30, nr. 6, str. 1163-1179;
17. Richards G.D., *The properties of elliptical wildfire growth for time dependent fuel and meteorological conditions*, Combustion Science and Technology 1993. vol. 92, nr. 1, str. 145-171;

18. Alexander M.E., *Estimating the length-to-breadth ratio of elliptical forest fire patterns*, in „8th Conference on Fire and Forest Meteorology” 1985, str. 287-304;
19. Anderson H.E., *Predicting wind-driven wildland fire size and shape*, Ogden, UT: Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station 1983, General Technical Report INT-305;
20. Czerpak T., Maciak, T., *Modelowania pożaru lasu. Część II. Symulacja komputerowa pożaru wybranego kompleksu leśnego*. CNBOP, Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza 2012;
21. Maciak, T., *Modelowania pożaru lasu. Część III. Modele paliwowe*. CNBOP, Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza 2012;
22. Maciak, T., Czerpak T., *Modelowania pożaru lasu. Część IV. Modele inicjacji i rozprzestrzeniania się ognia koron drzew*. CNBOP, Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza 2012.

#### Dodatek A

#### Wykaz ważniejszych oznaczeń występujących w pracy:

- $\beta$  – współczynnik upakowania
- $\varepsilon$  – efektywność ogrzewania
- $\eta_\delta$  – efektywność strefy reakcji
- $\eta_M$  – współczynnik tłumienia wilgoci
- $\eta_S$  – współczynnik tłumienia składników mineralnych
- $\rho_{be}$  – skuteczna gęstość (ilość paliwa na jednostkę objętości warstwy paliwa)
- $\rho_b$  - rzeczywistej gęstości paliwa, gęstość drewna całkowicie suchego
- $\sigma$  – iloraz powierzchni i objętości cząstki paliwa
- $\tau_R$  – czas reakcji
- $\Gamma$  – potencjalna szybkość reakcji
- $\Phi_w$  – współczynnik wiatru
- $\Phi_w$  – współczynnik nachylenia
- $CBH$  – wysokość podstawy korony
- $C_{pw}$  – ciepło właściwe wody
- $C_{pd}$  – ciepło właściwe suchego drewna
- $D$  – głębokość strefy reakcji
- $I_{xig}$  – poziomy strumień ciepła pochłanianego przez jednostkę objętości paliwa w czasie zapłonu
- $I_p$  – strumień ognia
- $I_R$  – intensywność reakcji
- $I_b$  – intensywność linii ognia
- $I_0$  – krytyczna intensywność niezbędna do inicjacji ognia korony
- $h$  – ciepło właściwe paliwa
- $M_f$  – współczynnik wilgotności paliwa
- $M$  – współczynnik wilgotności liści korony



$Q_{ig}$  – ciepło przed zapłonowe

$R$  – szybkość przemieszczania się linii pożaru

$RAC$  – krytyczny współczynnik rozprzestrzeniania się pożaru koron

$S_T$  – zawartość składników mineralnych w paliwie

$T_{ig}$  – temperatura zapłonu

$\Delta T_{ig}$  – zakres temperatur zapłonu

$\Delta T_b$  – zakres temperatur wrzenia

$U$  – prędkość wiatru na wysokości  $H$

$V$  – utajone ciepło parowania

$a, b, c$  – wymiary osi elipsy

$w_n$  – czysty początkowy ładunek paliwa

$w_r$  – pozostały ładunek mierzony natychmiast po przejściu strefy reakcji

$w_0$  – ładunek suchego paliwa korony

## Dodatek B

Jednostki:

$ft$  – stopa = 30,48 centymetra

$lb.$  – funt = ok. 0,454 kg

$a$  – akr = ok. 0,405 ha

$BTU$  – *British Thermal Unit* = ok. 1,055kJ

$in.$  - cal = 2,54 centymetra

## Recenzenci

prof dr hab. Inż. Mirosław Kosiorek

prof. dr hab. Andrzej Teodorczyk