

FIZYKA I CHEMIA POŻARU CZYLI JAK MODEL ROZUMIE POŻAR

Adam Kochański

Warsztaty naukowe: „Modelowanie Pożarowe”
IMGW, Warszawa 21 Czerwca, 2023



Centrum
Modelowania
Meteorologicznego



FULBRIGHT
Specialist Program

Pożar i spalanie

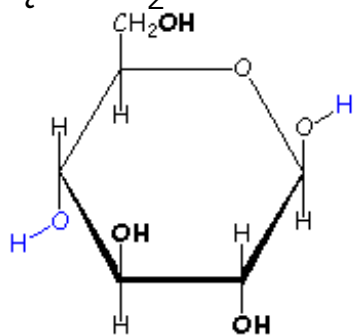
- Pożar to niekontrolowany i samoistny proces chemiczny utlenianiem paliw organicznych, który jest ogólnie związany z termicznym zniszczeniem.
- Spalanie jest procesem chemicznym, w którym paliwo i utleniacz reagują, wytwarzając ciepło i produkty spalania
- W ogniu ciepło procesu spalania służy do podtrzymania niekontrolowanego spalania materiału organicznego.
- Ogólnie rzecz biorąc, proces spalania można zapisać jako:

Paliwo + Utleniacz = Produkty + Ciepło



Spalanie jako proces chemiczny

Głównym składnikiem drewna jest celuloza, która w idealnych warunkach spala się uwalniając ciepło, parę wodną i CO_2



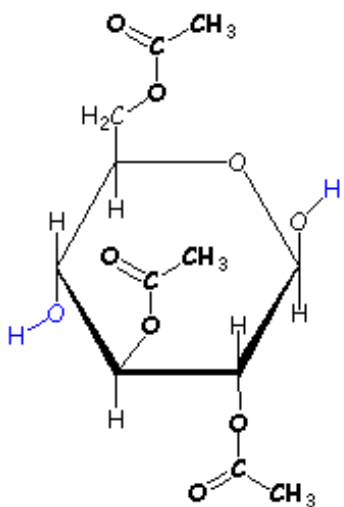
Glukoza / Celuloza

Reakcja chemiczna



Wydzielone ciepło

$$14.2 \text{kJ/g} = 14.2 \text{MJ/kg}$$



Atetat Glukozy/Acetat Celulozy



$$16.2 \text{kJ/g} = 16.2 \text{MJ/kg}$$

Różne rośliny mogą mieć różny skład chemiczny i może uwalniać nieco inną ilość energii

Spalanie w kontekście pożarów terenów niezurbanizowanych

- W trakcie tego wykładu będziemy mówić tylko o spalaniu materiałów organicznych. (Materiały organiczne oznaczają, że są oparte na węglu)
- Spalanie materiałów organicznych jest nadal dość ogólne i obejmuje utlenianie zarówno materiałów naturalnych, jak i przetworzonych.
- Naturalne materiały obejmują roślinność, rozłożoną roślinność, węgiel i węglowodory (oleje, smoły itp.)
- W kontekście pożarów terenów niezurbanizowanych skupimy się wyłącznie na roślinności (drewnie)
- Termin Paliwo będzie się odnosił do naturalnego materiału palnego żywego lub martwego takiego jak trawa, ściółka, igliwie, liście, gałęzie, korony drzew, pnie, krzewy, wrzosowiska itd.

Spalanie

Spalanie jako reakcję utleniania można opisać za pomocą równania **Arrheniusa**.

Równanie Arrheniusa wskazuje, że zarówno paliwo, jak i utleniacz są wymagane do podtrzymania spalania.

Jeśli którekolwiek ze stężeń paliwa utleniacza spadnie, szybkość spalania ω również spadnie.

$$\omega = A \times Y_f^n \times Y_o^m \times e^{-E/RT}$$

(równania **Arrheniusa**)

A, n, m, R - stałe

Y_f - stężenie paliwa

Y_o - stężenie utleniacza

E - energia aktywacji

T - temperatura

Y_f i Y_o są stężeniami bezjednostkowymi (frakcjami molowymi), n i m są stopniami reakcji opisującymi wrażliwość reakcji na stężenie reagentów.

Szybkość chemiczna opisuje szybkość wytwarzania produktów lub zużycia reagentów

Spalanie - zależność od temperatury

Spalanie następuje w określonym miejscu, w którym substrat (substraty) spotyka się z utleniaczem i gdzie temperatura jest wystarczająco wysoka, aby podtrzymać spalanie. To miejsce nazywa się **strefą reakcji**.

Tak długo, jak obecna jest wystarczająca ilość materiału palnego i utleniacza, a temperatura jest wystarczająco wysoka, reakcja spalania zachodzi z szybkością reakcji ω :

$$\omega = A \times Y_f^n \times Y_o^m \times e^{-E/RT} \quad (\text{Arrhenius equation})$$

A, n, m, R - stałe

Y_f - stężenie paliwa

Y_o - stężenie utleniacza

E - energia aktywacji

T - temperatura

$$e^{-E/RT} = \frac{1}{e^{E/RT}}$$

Dla niskich temperatur ten termin ten szybko spada do zera i reakcja ustaje. Dla wysokiego T, E/R, mianownik jest mały, a cały termin jest duży (reakcja przebiega szybko).

RT reprezentuje energię cząsteczek, jeśli jest wyższa niż energia aktywacji E, spalanie będzie zachodzić.

wielkość energii aktywacji (E) określa wrażliwość szybkości reakcji na temperaturę:

im większa wartość E (wysoka energia aktywacji), tym bardziej wrażliwa jest szybkość reakcji na zmiany temperatury reagentów.

Reakcje spalania mają bardzo wysokie energie aktywacji, dlatego są niezwykle wrażliwe na temperaturę!

Ciepło wytwarzane podczas spalania

Gdy cząsteczki reagentów spalają się, aby utworzyć produkty, uwalniają energię.

Energia wytwarzana w jednostce czasu i objętości reagentów jest związana **szybkością spalania**.

Gdzie: $Q = \rho \Delta H_c \omega$

Q - wytworzone ciepło [$J/m^3 s$]

ρ - gęstość reagentów [kg/m^3]

ΔH_c - ciepło spalania [J/kg]

ω - szybkość spalania [$1/s$]

Ciepło spalania zależy od składu chemicznego paliwa

Fuel	ΔH_c (MJ/kg _{FUEL})
Hydrogen	141.80
Propane	50.35
Gasoline	47.30
Paraffin	46.00
Kerosene	46.20
Coal (lignite)	15.00
Wood - Drewno	15.00
Peat (dry)	15.00
PVC (Polyvinyl chloride)	17.50
PE (Polyethylene)	44.60

Z chemicznego punktu widzenia nie ma czegoś takiego jak "proste spalanie"
 Nawet uproszczone spalanie metanu (CH_4) jest skomplikowane...

9 Emissions

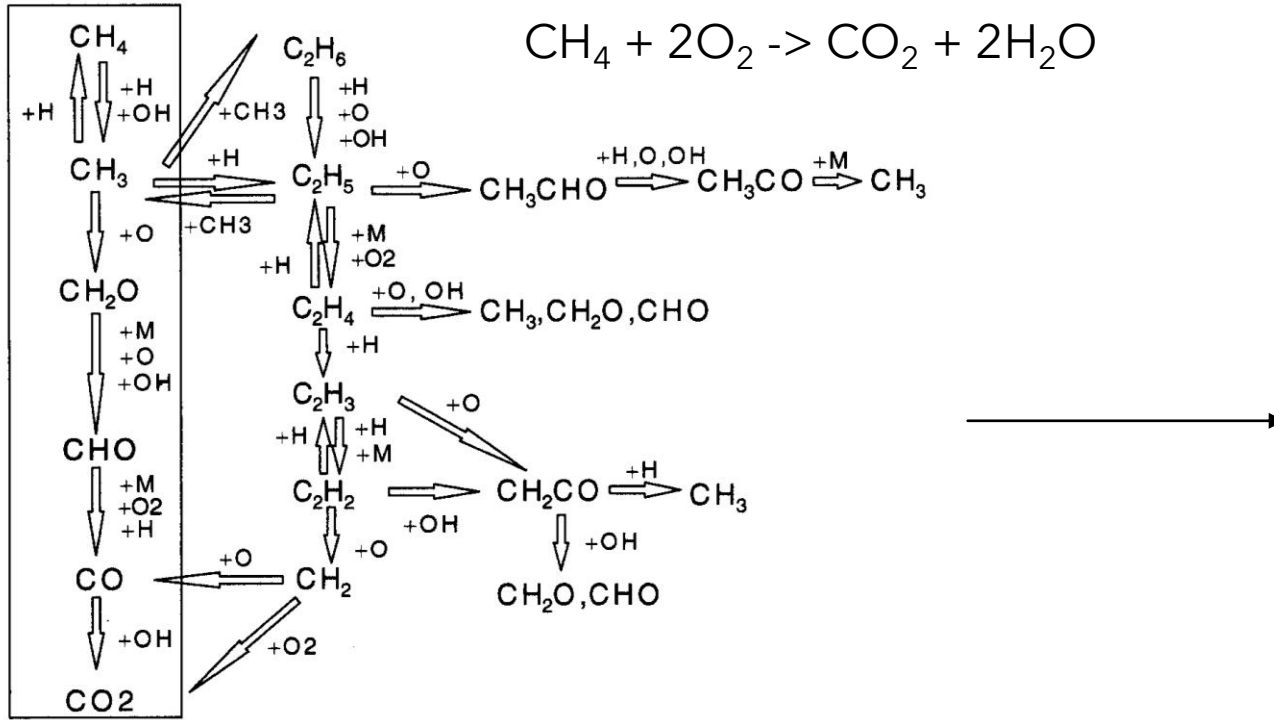
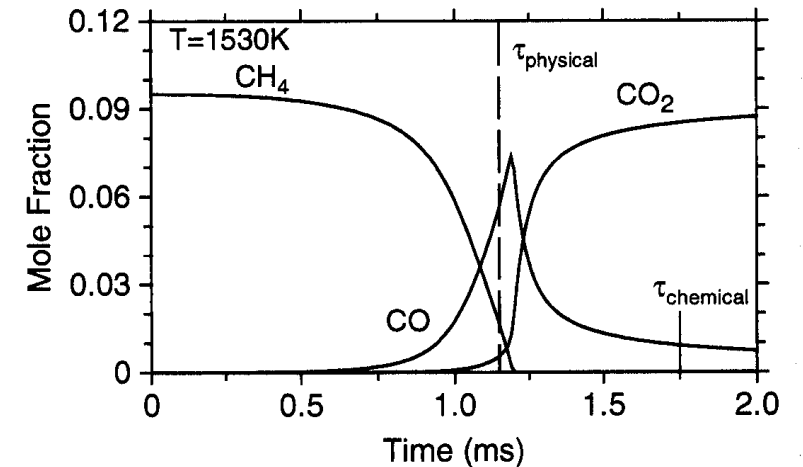
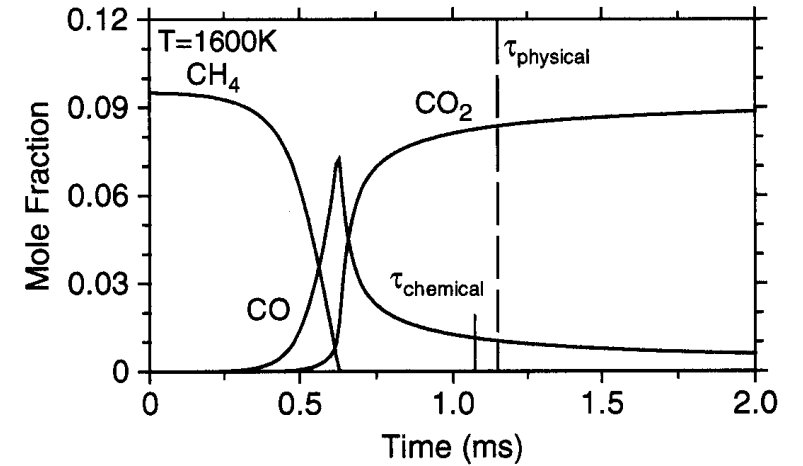


Fig. 3.6 Simplified flow diagram for methane combustion



Dobłą rzeczą jest to, że reakcje te są bardzo szybkie, więc w przeciwieństwie do silników odrzutowych lub spalinowych, w pożarach możemy zastosować dalsze uproszczenia, ponieważ czas przebywania płomienia jest o rząd wielkości dłuższy niż czas chemiczny.

Głębsze spojrzenie na proces spalania

Proces spalania może przebiegać różnymi ścieżkami chemicznymi / fizycznymi, co czyni go bardzo złożonym procesem.

Możemy go jednak nieco uogólnić, rozbijając na osobne podprocesy:

Piroliza:

Biomasa (c stałe) + Ciepło → Pirolizat (gaz) + Węgiel drzewny (c stałe) + Popiół (c stałe)

Utlenianie w fazie stałej :

Węgiel drzewny (solid) + O₂ → Ciepło + CO₂ + H₂O + gazy i popiół (c stałe)

Utlenianie w fazie gazowej (płomień):

Pirolizat (gaz) + O₂ → Ciepło + CO₂ + H₂O + inne gazy

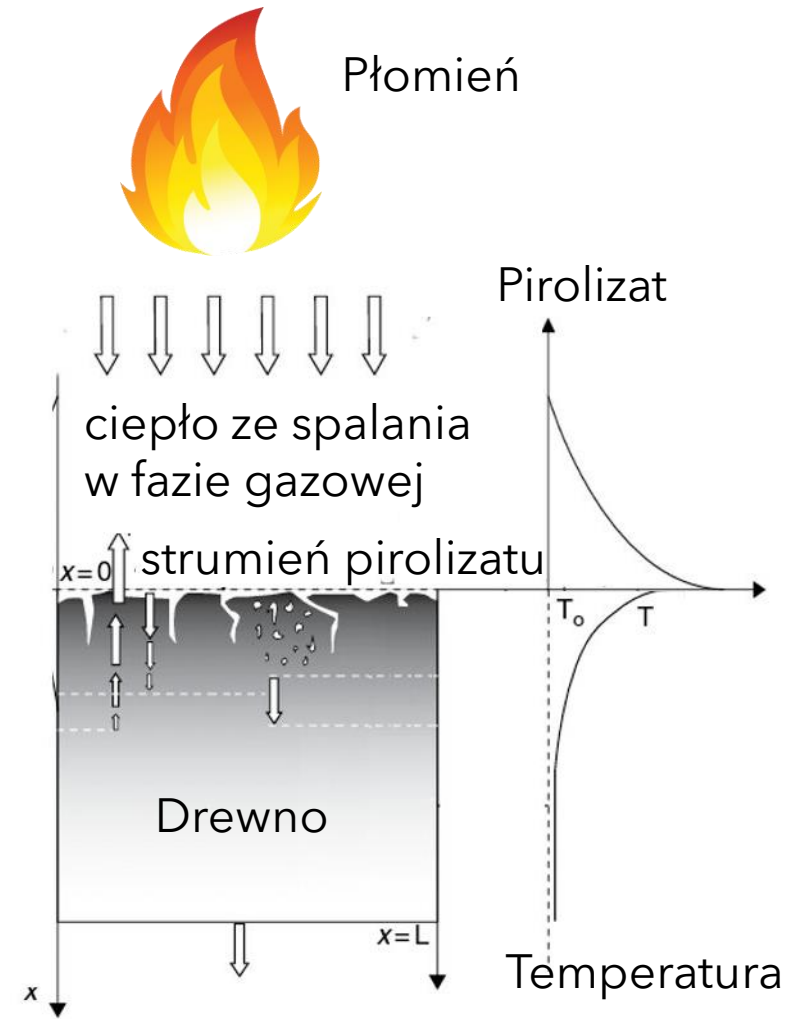


Piroliza

Piroliza jest warunkiem wstępnym spalania paliw stałych

Paliwo stałe musi najpierw zostać przekształcone w gazy palne, zanim dojdzie do płonącego spalania

Istotną cechą procesu spalania ciał stałych takich jak drewno jest że ciepło uwolnione w trakcie spalania w fazie gazowej dostarcza energii koniecznej do przeprowadzenia pirolizy (rozkładu termicznego potrzebnego to tworzenia gazowego paliwa gazowego (pirolizatu) spalanego następnie w fazie gazowej.



Pyroliza

Lokalna masowa produkcja paliwa gazowego może być przedstawiona jako:

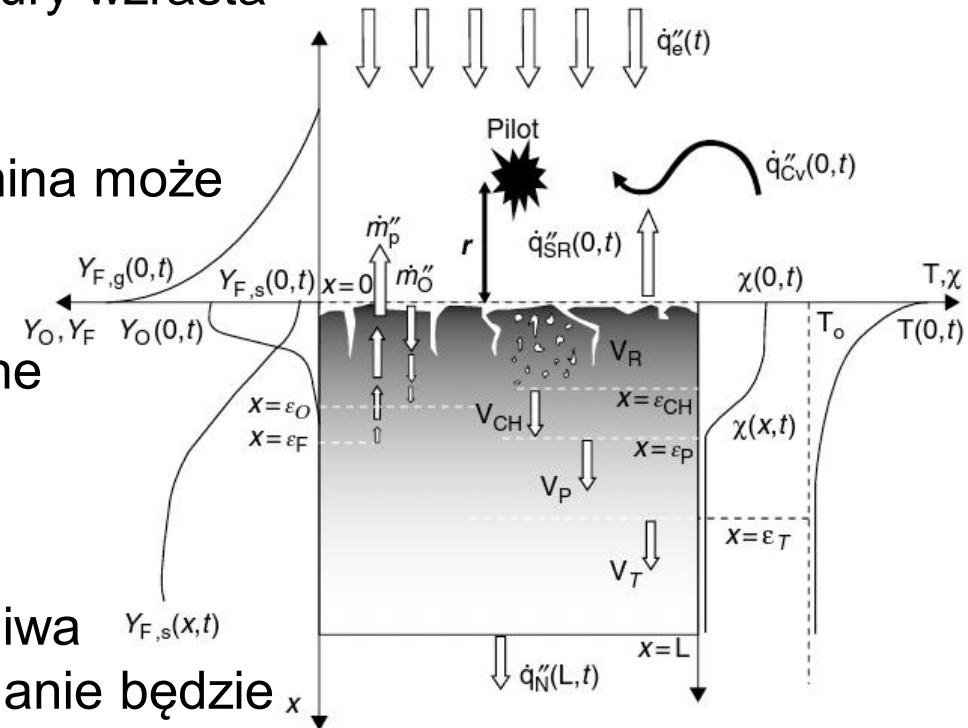
$$m_p(x,t) = Y_{F,s}(x,t) \sum_{i=1}^{i=N} [A_i Y_O^{m_i}(x,t) \cdot Y_F^{n_i}(x,t) e^{-E_{ii}/RT(x,t)}]$$

Gdy ciepło jest przekazywane do paliwa stałego, następuje piroliza i wytwarzane jest paliwo gazowe. Wraz ze wzrostem temperatury wzrasta produkcja paliwa gazowego m_p

Po utworzeniu wystarczającej ilości paliwa łatwopalna mieszanina może ulec spalaniu.

Ciepło wytwarzane ze spalania w fazie gazowej jest przenoszone do paliwa stałego, aby mogła wystąpić piroliza wytwarzająca łatwopalne gazy (pirolizat)

Sprężenie zwrotne ciepła z płomieni podtrzymuje produkcję paliwa a jeśli wyprodukowana zostanie wystarczająca ilość paliwa, spalanie będzie samowystarczalne (będziemy mieli ogień)



Process Zwęglenia

- Zwęglenie (charing) to proces wytwarzania węgla drzewnego po pirolizie
- Temperatury do rozpoczęcia procesu zwęglenia są zmienne, ale generalnie, oscylują około 275°C
- Węgiel drzewny jest dobrym izolatorem ciepła, przez co spowalnia proces spalania



Produkty spalania

- Wynik pirolizy i procesu spalania prowadzi do wytworzenia szeregu materiałów i związków z węgla drzewnego:
 - Popiół nieorganiczny, lotne gazy, aerozole i sadza (cząstki).
 - Wiele z tych produktów obserwuje się w słupie dymu i mogą być transportowane na znaczne odległości.
- Dym z pożarów zawiera **tlenek węgla CO**, bezbarwny, bezwonny i toksyczny gaz. Strażacy pracujący w pobliżu pożaru są najbardziej narażeni na wysokie jego dawki.
 - W pewnej odległości od ognia (kilkaset metrów) poziom dymu zazwyczaj nie ma wysokiego poziomu tlenku węgla. Istnieją jednak wysokie poziomy **cząstek stałych PM2.5** (cząstki o średnicy mniejszej niż 2,5 μm (mikrometra)).
 - Dym z pożarów zawiera również inne substancje chemiczne zwane lotnymi związkami organicznymi (**VOC**), z których wiele powoduje podrażnienie oczu, nosa i gardła i ma **własności rakotwórcze**
 - **Sadza**, jeśli powstaje w wyniku rekombinacji odparowanych cząsteczek organicznych w celu utworzenia nowego materiału węglowego i jest produktem spalania (średnica , 1 μm)

MODELE SZYBKOŚCI RPOZPRZSTRZENIANIA

- Modele rozprzestrzeniania się ognia są uproszczonymi formułami matematycznymi, zwykle opartymi na eksperymentach w skali laboratoryjnej, które opisują procesy fizyczne rządzące rozprzestrzenianiem się ognia.
- Pozwalają one na obliczenie szybkości rozprzestrzeniania się ognia na podstawie danych wejściowych opisujących topografię, właściwości paliwa i warunki pogodowe (wiatry).
- Mogą być postrzegane jako znaczne uproszczenie fizycznych modeli spalania CDF, ale w rzeczywistości mają charakter empiryczny (patrz modele Rothermela lub McArthur)



Dane wejściowe:

- Topografia
- Opis paliwa
- Wiatr

Równania Matematyczne

- Empiryczne: równania algebraiczne
- $R = I_R \xi (1 + \Phi_W + \Phi_S) / \rho_n \epsilon Q_{ig}$
- Fizyczne: zachowanie masy, ciepła i pędu

Matematyczne oszacowanie:
Szybkości rozprzestrzeniania się ognia
(jak szybko rozprzestrzenia się front pożarowy)

NAJPROSTSZY MODEL EMPIRYCZNY

- Wyobraźmy sobie, że chcemy stworzyć własny model ognia.
- Przeprowadzasz eksperymenty i mierzysz szybkość rozprzestrzeniania się w różnych warunkach wiatrowych
- Wykreślasz dane i próbujesz znaleźć funkcję matematyczną, która pasuje do danych
- Funkcją, która najlepiej pasuje do danych, jest naszym modelem, na przykład:

Ogólnie rzecz biorąc, funkcja liniowa ma postać: $y = a x + b$

Dla nas **y** to szybkość rozprzestrzeniania (**ROS**), a **x** to wiatr, więc wykonujemy eksperymenty w tunelu wiatrowym, w których modyfikujemy **x** (wiatr) i mierzymy wartości **ROS** (**y**).

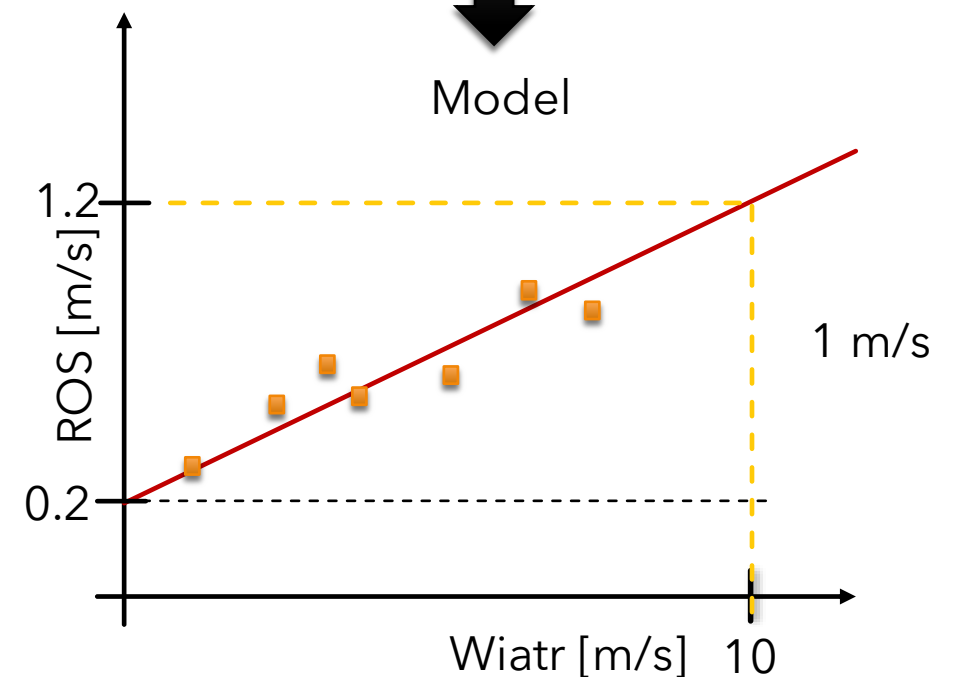
$$\text{ROS} = m \times \text{WIATR} + b$$

z danych widzimy że: $m = 1/10$, $b = 0,2$

więc:

$$\text{ROS} = 0,1 \times \text{WIATR} + 0,2$$

Experiments

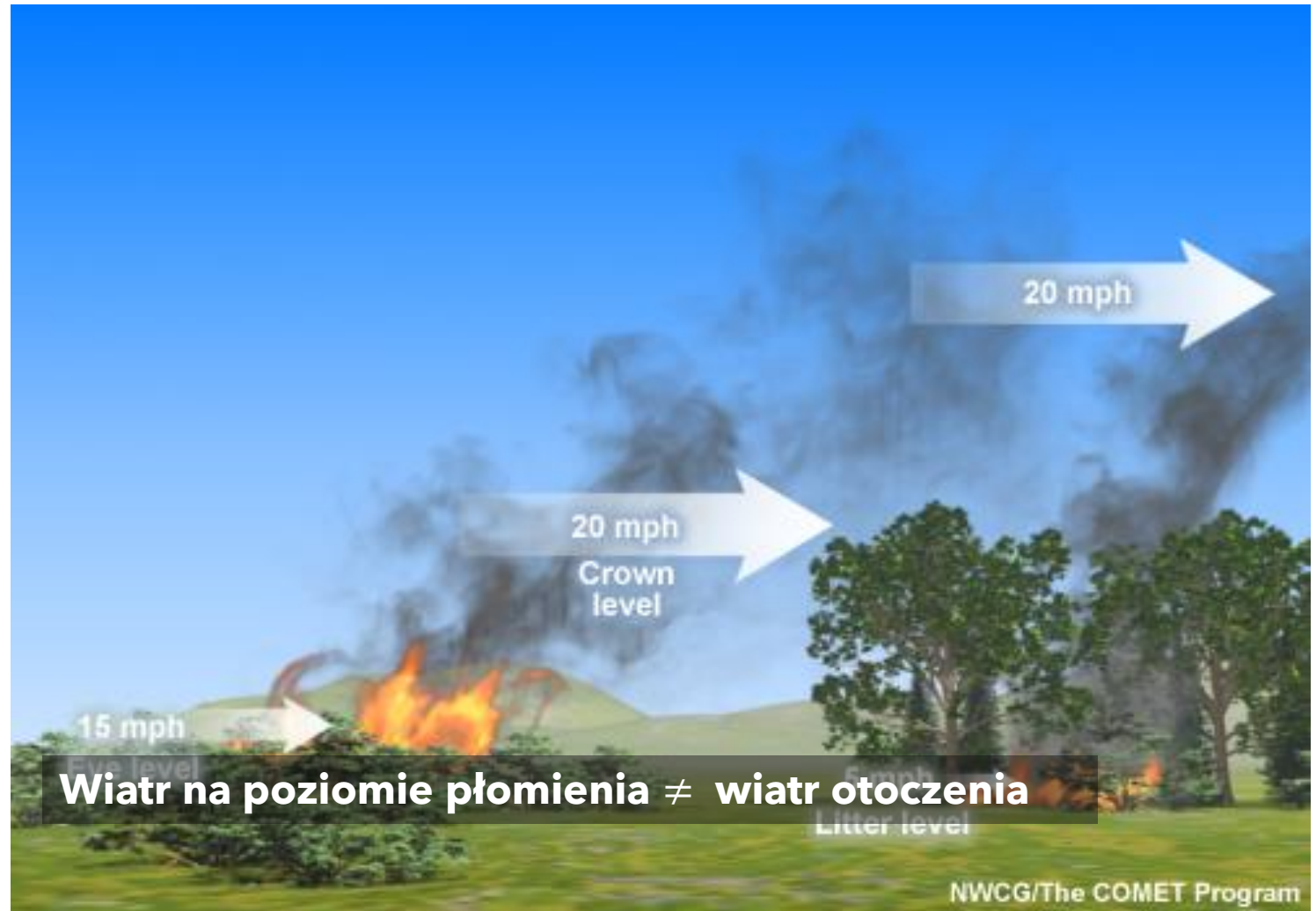


PODSTAWOWE CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA TEMPO ROZPRZESTRZENIANIA

- Prędkość wiatru
- Stromość zbocza
- Rodzaj paliwa
- Wilgotność paliwa

Ale sam pożar wpływa na lokalne warunki mikrometeorologiczne i generuje tak zwaną cyrkulację pożarową

więcej o tym w kolejnym wykładzie - „Jak Pożar Modyfikuje Pogodę”



Modele empiryczne i quasi-empiryczne

Modelowanie empiryczne

Empiryczne modelowanie pożarów lasów skupiło się na określeniu kluczowych cech używanych do opisu zachowania pożaru.

Na ogół były to ROS ognia czołowego (ta część obwodu pożaru jest zdmuchiwana pod wiatr lub porusza się pod górę i zwykle o znacznie większej intensywności niż reszta obwodu pożaru).

Tempo propagacji frontu, chociaż inne cechy, takie jak wysokość płomieni, kąt płomieni i głębokość płomieni czoła pożaru mogą być również modelowane.

Modele empiryczne

Empiryczne modele rozprzestrzeniania są zwykle konstruowane zakładając że prędkość rozprzestrzeniania, R , jest funkcją (F) kilku niezależnych zmiennych (Cheney et al. 1998):

$$R = F(U, M_f, w, s, \dots)$$

Hipotetycznie to może być:
 $ROS = WIATR \times 0.1 + 0.2$
 $R = 0.1U + 0.2$

gdzie:

U = prędkość wiatru

M_f = zawartość wilgoci w paliwie (%)

w = ilości materiału palnego (paliwa)

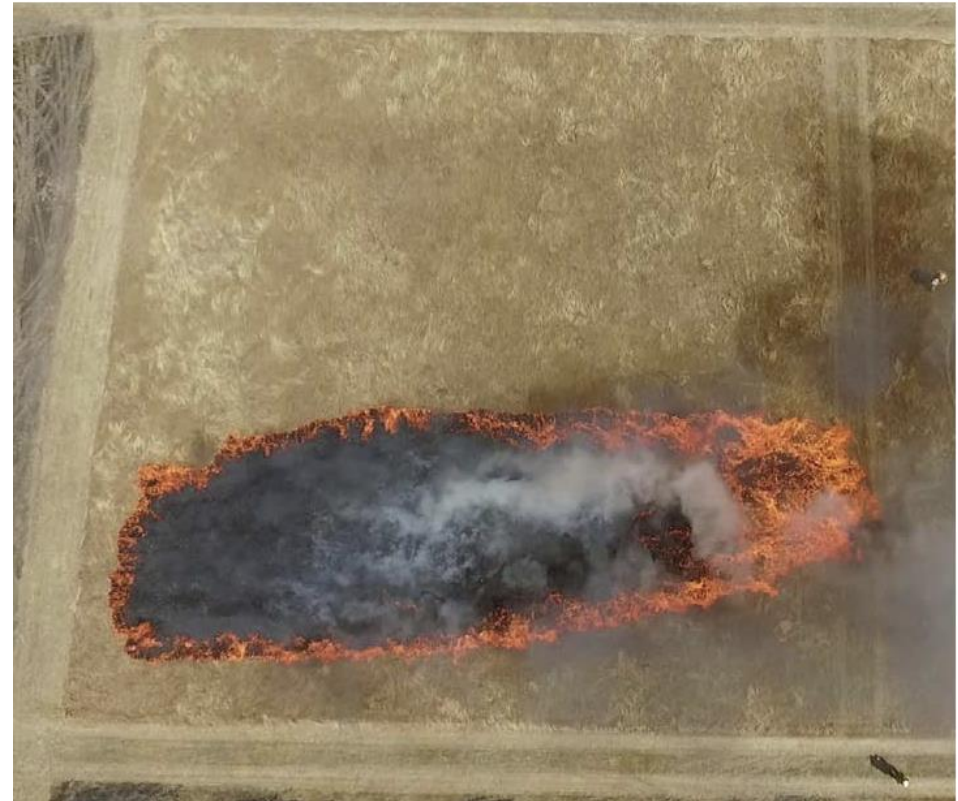
s = nachylenie topograficzne terenu

F = funkcja łącząca zmienne niezależne (inne zmienne niezależne mogą obejmować wysokość paliwa, gęstość nasypową paliwa, stabilność atmosferyczną itp.)

...

Eksperymenty Pożarowe

- Mimo że obserwacje pożarów lub wypaleń kontrolowanych wykorzystano do opracowania empirycznych modeli zachowania się ognia, dominującą metodą są "eksperymentalne" pożary-pożary, w których jedynym celem jest pożar charakterze eksperymentalnym w dobrze charakteryzowanych warunkach.
- Wielu badaczy zdecydowało się ograniczyć lub kontrolować możliwe naturalne wahania zmiennych, przeprowadzając eksperymentalne pożary w warunkach laboratoryjnych



FireFlux II experimental fire

- Charakterystyka paliwa
- Warunki pogodowe
- Lokalne wiatry
- Charakterystyka pożaru



FireFlux II experimental fire

- Dwa linie zapłonowe
- Wieże meteorologiczne z anemometrami sonicznymi i termoparami
- Zdjęcia w podczerwieni z helikoptera
- Lidar i Sodar
- Charakteryzacja paliwa - wilgotność i masa na jednostkę powierzchni



Model rozprzestrzeniania Rothermela

Model Rothermela jest modelem półempirycznym, co oznacza, że zawiera komponenty, które opierają się na fizyce spalania i komponenty, które opierają się na laboratoryjnych wynikach eksperymentalnych. Podstawowa formuła modelu jest dość prosta, szybkość rozprzestrzeniania: **ROS** swobodnie rozprzestrzeniającego się ognia jest obliczana jako stosunek źródła ciepła do rozpraszania (utrata) ciepła.

$$ROS = \frac{\text{źródło ciepła}}{\text{utrata ciepła}}$$

Figure 2.--Schematic of no-wind fir.

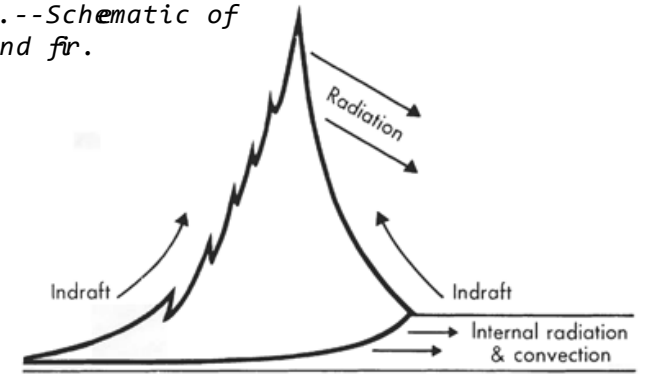


Figure 3.--Schematic of wind-driven fir.

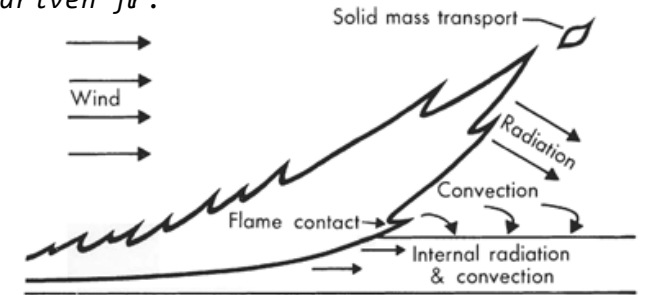
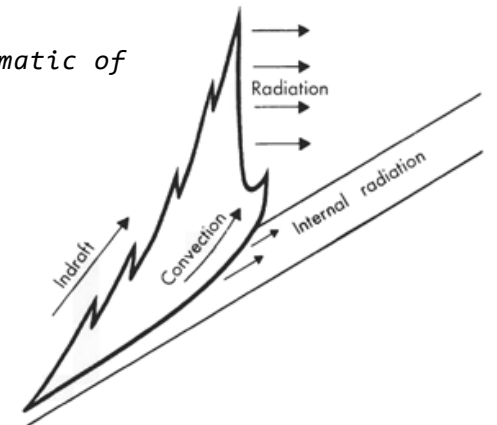


Figure 4.--Schematic of upslope fir.



Model rozprzestrzeniania Rothermela

$$ROS = \frac{\text{źródło ciepła}}{\text{utrata ciepła}}$$

źródło ciepła = szybkość wytwarzania ciepła na jednostkę powierzchni złoża paliwa

utrata ciepła = ciepło wymagane do podniesienia jednostkowej objętości złoża paliwa do temperatury zapłonu.

Jednostki wymiarowe są następujące:

$$ROS = \frac{\frac{kW}{m^2}}{\frac{kJ}{m^3}} = \frac{\frac{kJ}{m^2 s}}{\frac{kJ}{m^3}} = \frac{m^3}{m^2 s} = \frac{m}{s} \quad [W] = \frac{[J]}{[s]} \quad ROS = \frac{m}{s}$$

Figure 2.--Schematic of no-wind fir.

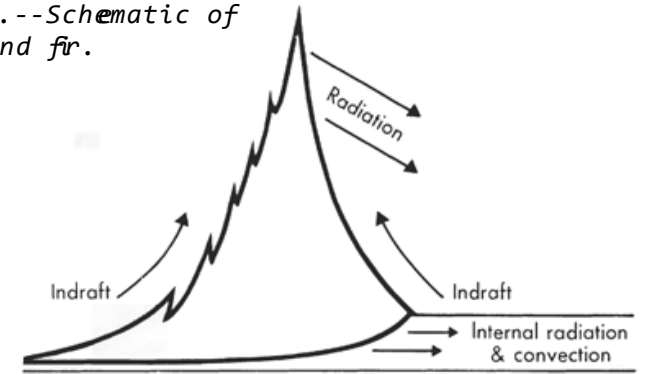


Figure 3.--Schematic of wind-driven fir.

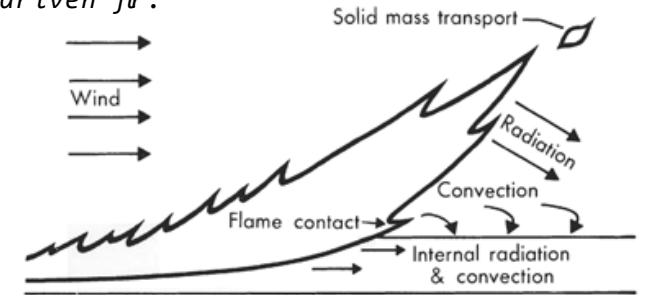
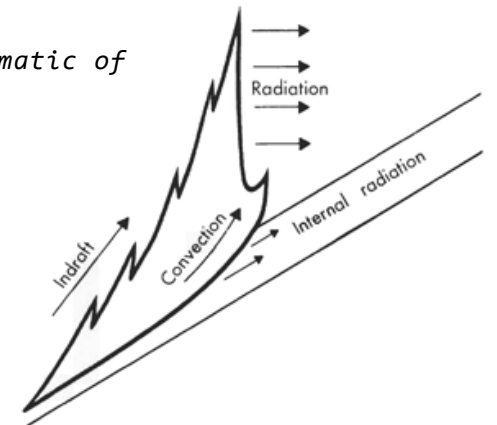


Figure 4.--Schematic of upslope fir.



Model rozprzestrzeniania Rothermela

$$ROS = \frac{\text{źródło ciepła}}{\text{utrata ciepła}}$$

Źródło ciepła

Termin źródła ciepła w równania prędkości rozprzestrzeniania składa się z czterech głównych czynników:

$$\text{źródło ciepła} = I_r * R_{pf} * (1 + W + S)$$

gdzie I_r jest intensywnością reakcji, R_{pf} jest propagującą częścią strumienia, W i S oznaczają wpływ wiatru i nachylenia na szybkość rozprzestrzeniania.

Ponieważ termin źródła ciepła jest licznikiem równania **ROS**, zwiększenie któregokolwiek z tych czynników zwiększa modelowaną szybkość rozprzestrzeniania się.

Model rozprzestrzeniania Rothermela

Intensywność Reakcji, I_R

$$\text{źródło ciepła} = I_r * R_{pf} * (1 + W + S)$$

Intensywność reakcji reprezentuje szybkość uwalniania ciepła na jednostkę powierzchni złoża paliwa.

Intensywność reakcji jest funkcją kilku czynników środowiska pożarowego:

- Zwiększenie obciążenia paliwem i zawartości cieplna zwiększa I_R ,
- Zwiększenie gęstości nasypowej i wilgotności zmniejsza I_R .

Model rozprzestrzeniania Rothermela

Współczynnik strumienia propagacji, R_{pf}

$$\text{źródło ciepła} = I_r * R_{pf} * (1 + W + S)$$

Propagujący współczynnik strumienia jest miarą tego, jak intensywność reakcji przyczynia się do rozprzestrzeniania się ognia poprzez ogrzewanie paliwa przed płonącym frontem.

Większość ciepła reprezentowanego przez intensywność reakcji jest przenoszona bezpośrednio do atmosfery przez konwekcję, gdzie nie może przyczynić się do rozprzestrzeniania się do przodu.

Termin R_{pf} uchwycy ten fakt. Jest to funkcja rozdrobnienia cząstek paliwa i gęstości nasypowej złoża. Na przykład drobniejsze cząstki paliwa wychwytyją większą część całkowitej energii.

Model rozprzestrzeniania Rothermela

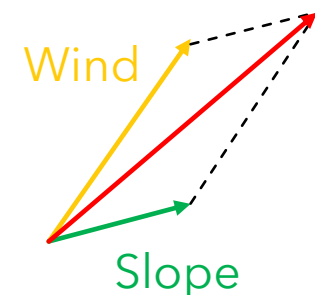
Wiatr i nachylenie gruntu: W , S

Termin W jest funkcją prędkości wiatru na wysokości połowy płomienia i rozdrobnienia cząstek paliwa.

S jest funkcją nachylenia terenu i gęstości nasypowej złoża paliwa.

W płaskim terenie bez wiatru, W i $S = 0$ i źródło ciepła redukuje się do:
 $I_R * R_{pf}$ (Intensywność Reakcji x Współczynnik strumienia propagacji)

Combined slope and wind effect



Model rozprzestrzeniania Rothermela

Utrata ciepła

Utrata ciepła jest funkcją trzech zmiennych:

$$\text{utrata ciepła} = BD * E_H * Q_{iq}$$

BD jest miarą kompaktowości złoża paliwa – ile masy paliwa jest upakowane w danej objętości.

BD oblicza się, dzieląc całkowite obciążenie paliwa przez głębokość złoża paliwa:

$$BD = \frac{\text{\textit{\textit{ładunek paliwa}}}}{\text{\textit{\textit{głębokość złoża}}}}$$

Model rozprzestrzeniania Rothermela

Efektywna liczba grzewcza, E_h

Określa ułamek całkowitego ładunku paliwa, który musi być podgrzany do zapłonu.

Prawie wszystkie bardzo drobne cząstki paliwa, takie jak łodygi trawy, muszą być podgrzane do temperatury zapłonu, więc złoża paliwa składające się z łodyg trawy mają efektywną liczbę grzewczą bliską 1.

Natomiast w przypadku gruboziarnistych cząstek paliwa, tylko ich powierzchnia musi być podgrzana do temperatury zapłonu, więc mają one mniejszą efektywną liczbę grzewczą.

W praktyce efektywna liczba grzewcza nie ma silnego wpływu na przewidywane zachowanie ognia w porównaniu z innymi czynnikami.

Model rozprzestrzeniania Rothermela

Ciepło zapłonu, Q_{ig}

Q_{ig} to ilość ciepła potrzebna do podgrzania danej masy paliwa do jego temperatury zapłonu.

Jest to funkcja zawartości wilgoci, ponieważ wilgoć musi zostać odparowana przed podniesieniem temperatury do zapłonu.

Model rozprzestrzeniania Rothermela

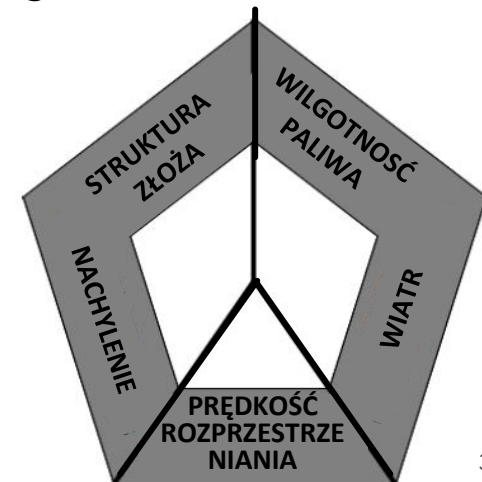
Ostateczne równanie

Połączenie oddzielnych równań źródła ciepła i utraty ciepła daje ostateczne równanie prędkości rozprzestrzeniania:

$$ROS = \frac{I_R * R_{pf} * (1 + W + S)}{BD * E_H * Q_{ig}}$$

I_R - Intensywność reakcji
 R_{pf} - współczynnik propagacji strumienia
 W - współczynnik wiatru
 S - Współczynnik nachylenia
 BD - gęstość nasypowa paliwa
 E_H - efektywna liczba grzewcza
 Q_{ig} - ciepło zapłonu

Cztery z pięciu elementów pięciokąta modelowania ognia są reprezentowane w tym ostatnim równaniu. Piąty element, względny kierunek rozprzestrzeniania się, jest obsługiwany poza równaniem rozprzestrzeniania.



Charakterystyka paliwa

Zawartość chemiczna paliwa

Ładunek paliwa

Układ paliwa

Rodzaj paliwa

Rozmiar i kształt

Wilgotność



Model rozprzestrzeniania Rothermela

Sześć charakterystyk złoża paliwa jest stosowanych w modelu Rothermela:

- całkowity ładunek paliwa (L)
- charakterystyczna wilgotność (MC)
- charakterystyczny stosunek powierzchni do objętości (SAV)
- gęstość nasypowa złoża paliwa (BD)
- zawartość cieplna paliwa (H)
- wilgotność martwego paliwa (Mx)

Typy Paliwa

Paliwa są pogrupowane w sześć rodzajów paliw, w oparciu o pierwotne paliwo, które przenosi ogień.

1. Trawa
2. Krzewy
3. Krzewy i trawa
4. Ściółka drewniana
5. Podszycie drewniane
6. Slash-Blowdown

1



4



2



5



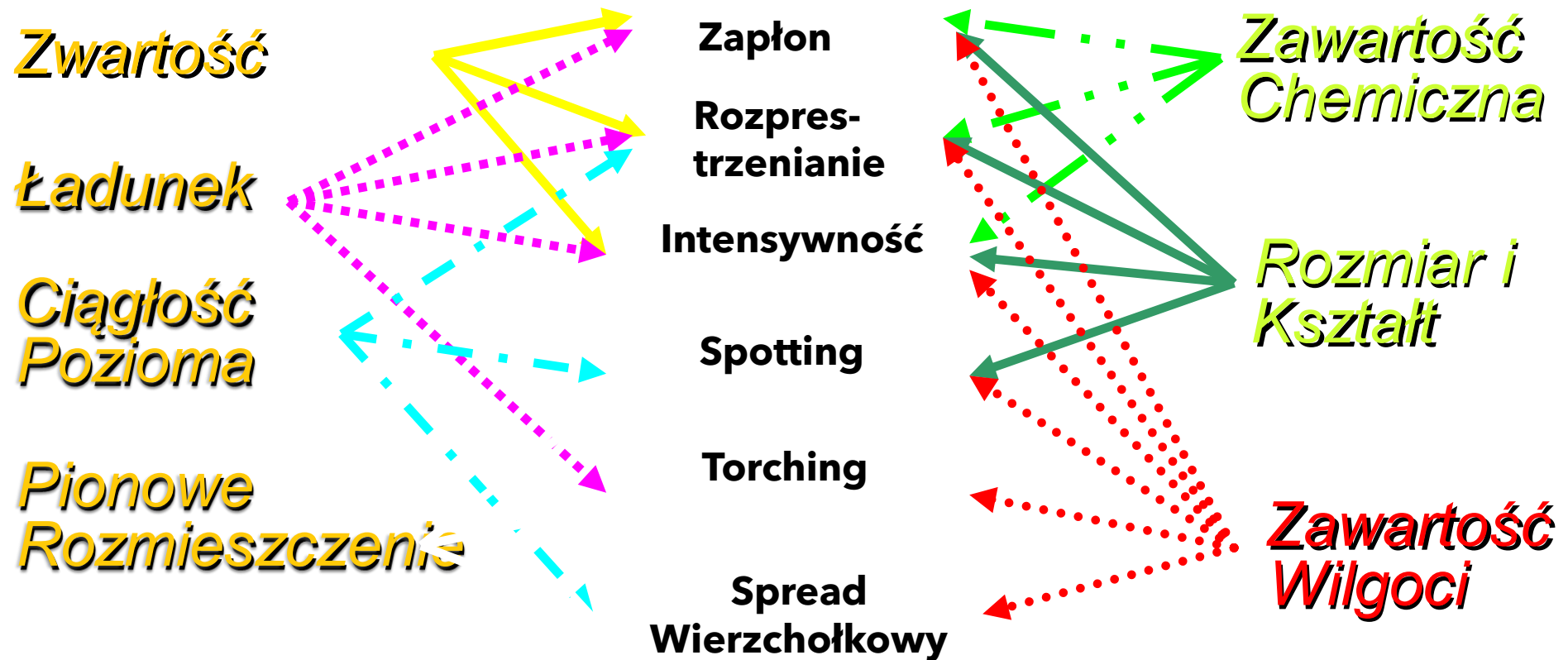
3



6



Charakterystyka paliwa i jej wpływ na pożar



Wilgotność paliwa i ciepło zapłonu

Ciepło zapłonu $Q_{ig} = Q_f + MQ_M$ (kJ kg⁻¹)

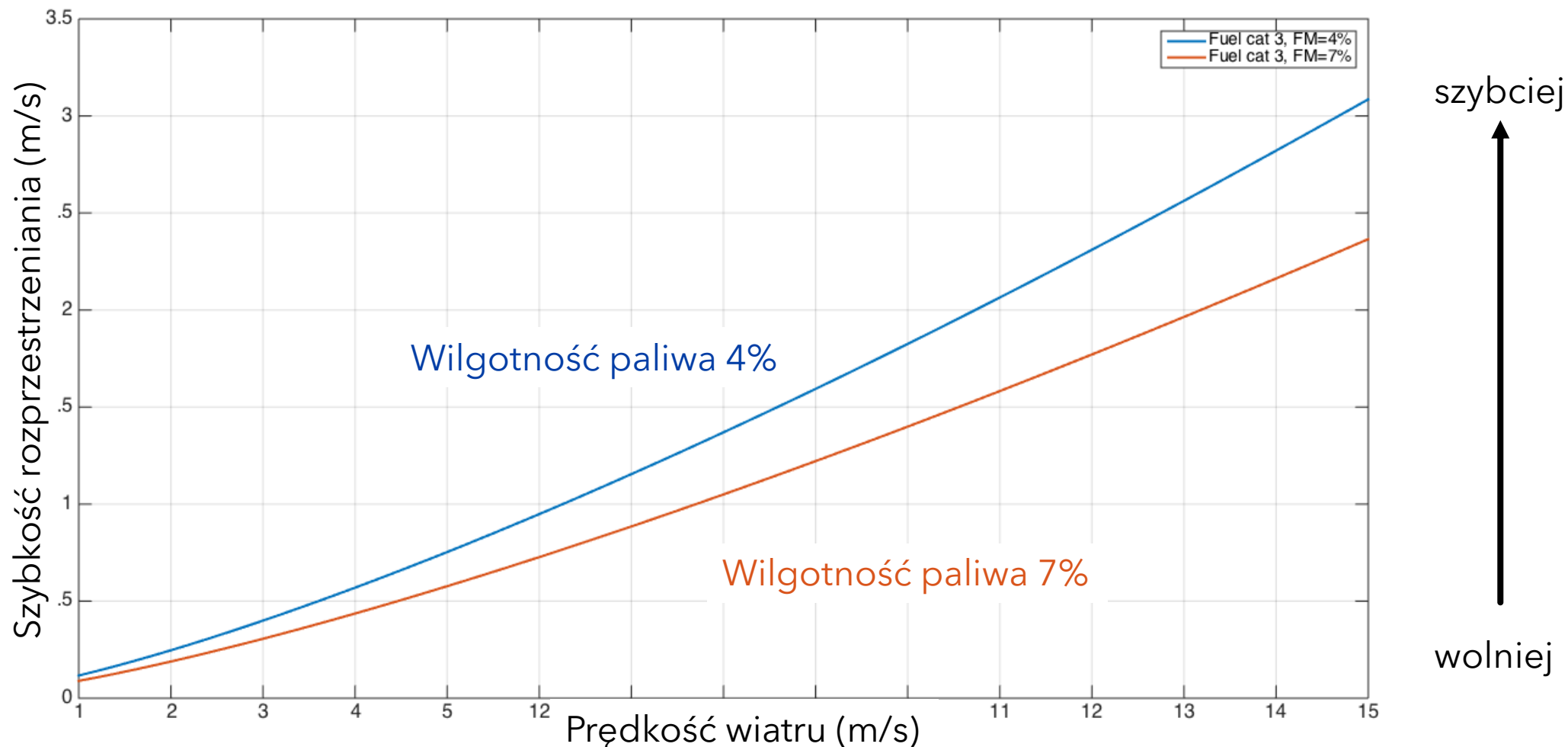
gdzie Q_f jest ciepłem wymaganym do podniesienia masy suchego paliwa z temperatury otoczenia do temperatury zapłonu (250-300C)

Q_M to energia potrzebna do podgrzania masy jednostkowej wody do 100° C, a następnie jej odparowania

M to ułamkowa zawartość wilgoci (Średnia cząstki lub warstwy paliwa wyrażona w przeliczeniu na suchą masę).

Zwiększenie ilości wilgoci zwiększa ciepło zapłonu i spowalnia pożar.

Szybkość rozprzestrzeniania w funkcji zawartości wilgoci



Niższa zawartość wilgoci w paliwie - szybsze rozprzestrzenianie się ognia
Wyższa zawartość wilgoci w paliwie - wolniejsze rozprzestrzenianie się ognia

Symulacje rozprzestrzeniania się ognia

- Model rozprzestrzeniania się ognia dostarcza w tylko jednowymiarowych informacji o tym, jak szybko czoło ognia będzie się rozwijać.
- Dla celów modelowania rozprzestrzeniania ognia należy w jakiś sposób przedstawić rzeczywistą geometrię i ewolucję frontu. Szybkość rozprzestrzeniania się jako liczba dostarczona przez model rozprzestrzeniania się ognia nie jest końcem historii!

Konwersja do ewolucji ognia obejmuje dwa odrębne procesy:

(1) przedstawienie obwodu pożarowego w modelu

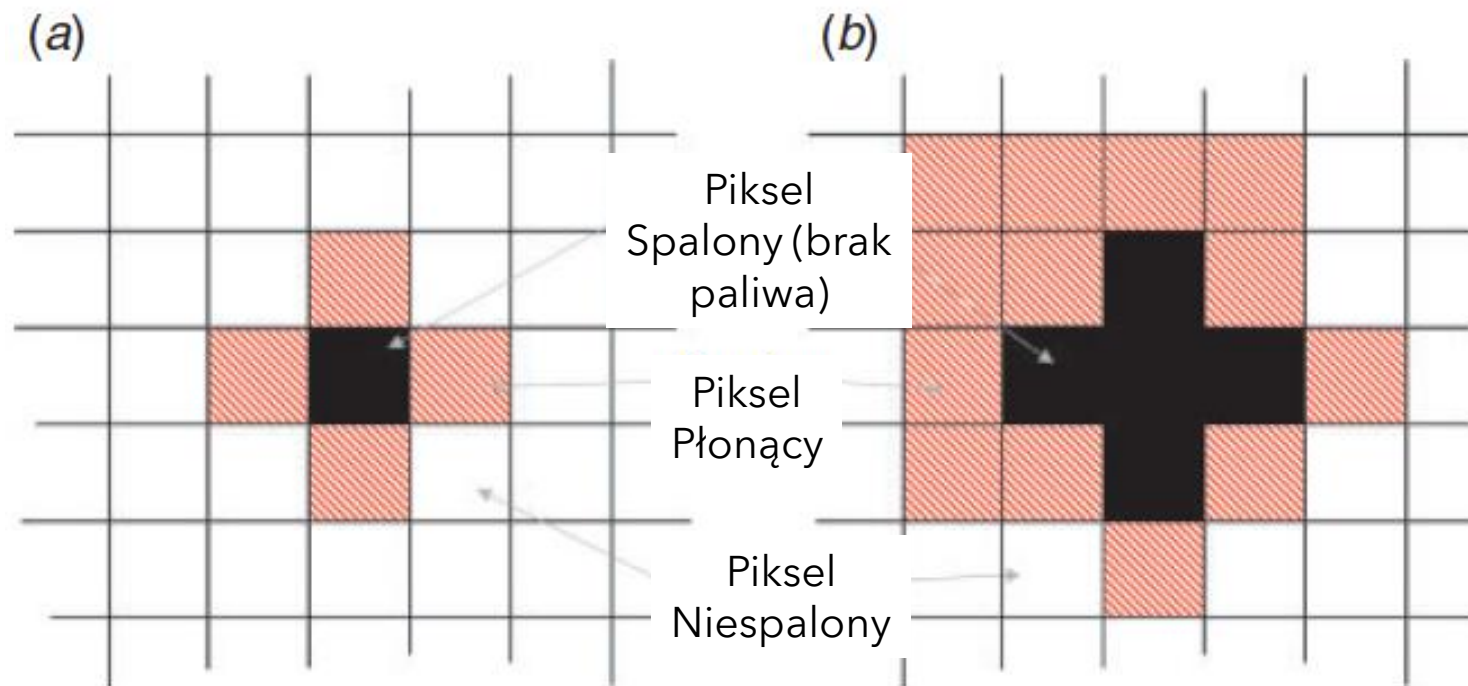
(2) propagowanie tej linii (zmiany kształtu) w trakcie symulacji

Rastrowa reprezentacja frontu ogniowego

Trzy podejścia do reprezentacji frontu pożarowego są wykorzystywane w modelach symulacyjnych

1. Symulacja oparta na rastrze

Ogień traktowany jest jako grupa głównie sąsiadujących ze sobą niezależnych komórek których liczba rośnie wraz z rozwojem pożaru (implementacja rastrowa).

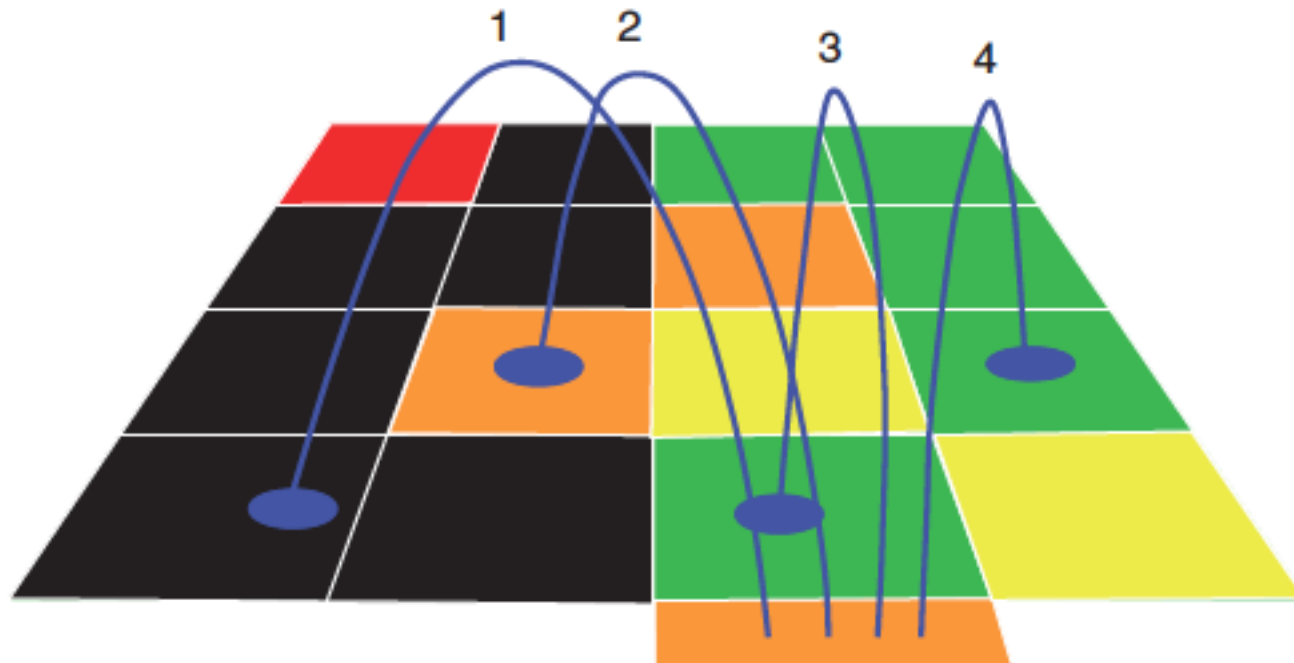


Propagacja w metodzie rastrowej

Propagacja ognia jest następnie przeprowadzana za pomocą jakiejś formy algorytmu ekspansji.

Progresja jest modelowana na podstawie prawdopodobieństwa zapłonu otaczających komórek

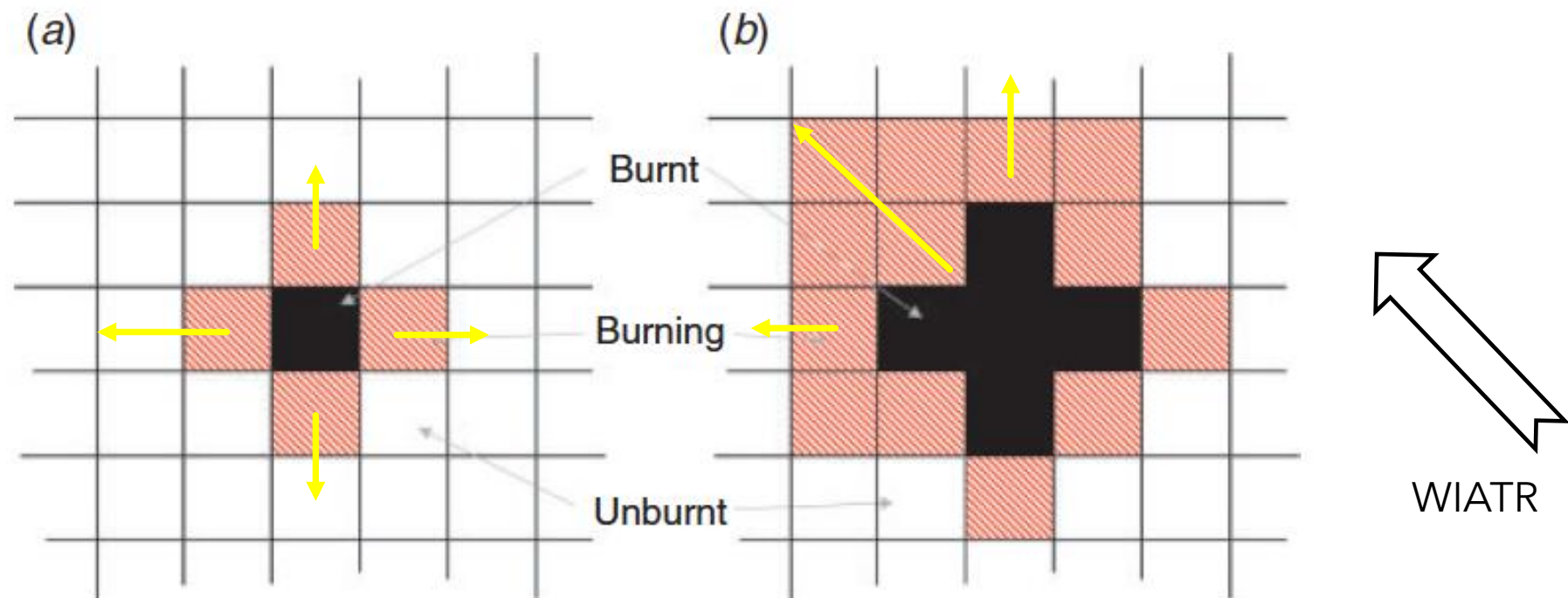
Symulacja oparta na automatach komórkowych (Cellular Automata)



←Rabbit Rules model,
Achtemeir 2003

Propagacja w metodzie rastrowej

Propagacja pożaru jest następnie przeprowadzana za pomocą algorytmu ekspansji, w którym propagacja do otaczających komórek jest modelowana na podstawie prawdopodobieństwa zapłonu (tzw. modele automatów komórkowych)

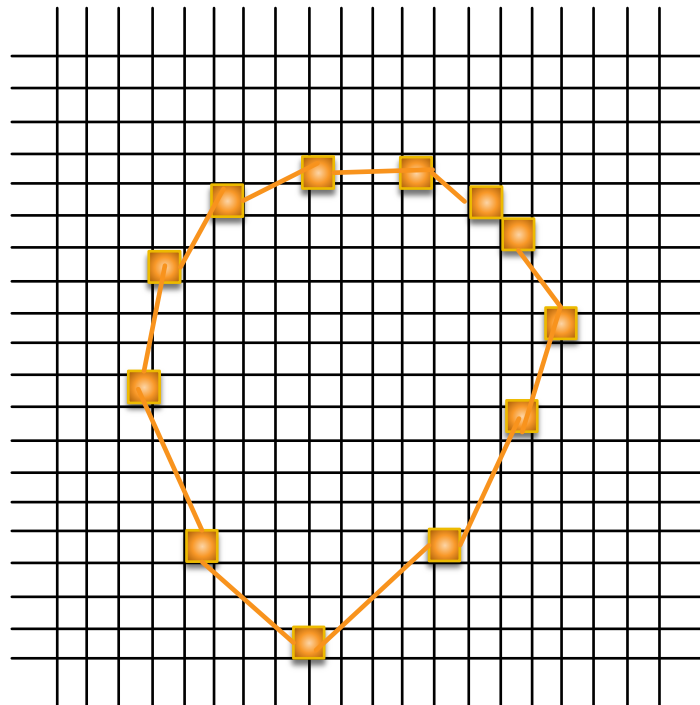


Wektorowa reprezentacja frontu ogniowego

Trzy podejścia do reprezentacji frontu pożarowego są wykorzystywane w modelach symulacyjnych

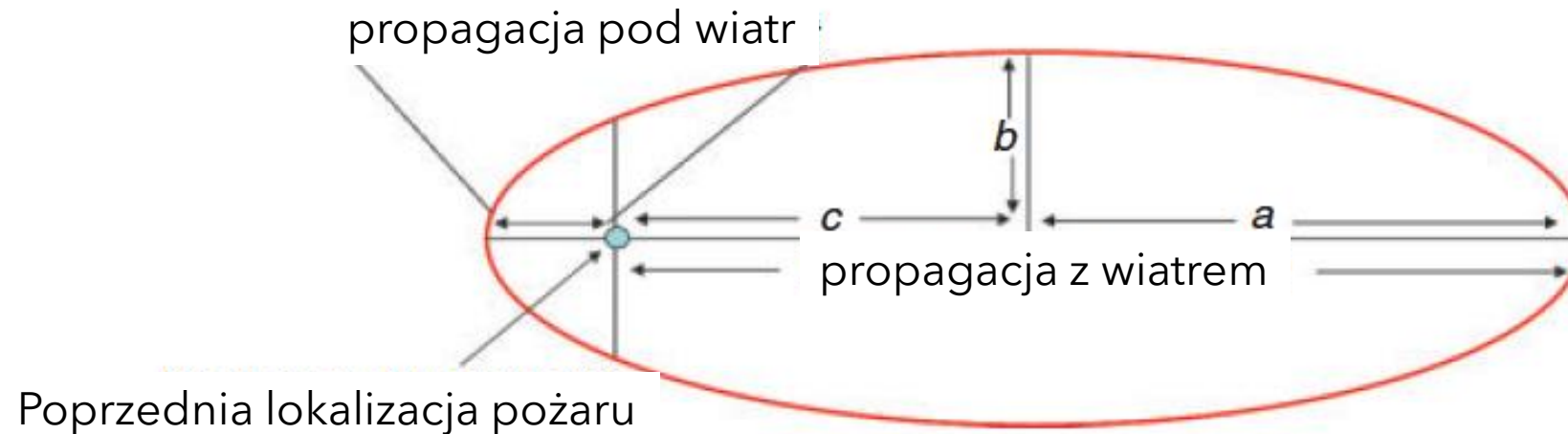
2. Symulacja wektorowa

Obwód pożaru jest traktowany jako zamknięta krzywa połączonych punktów (implementacja wektorowa).



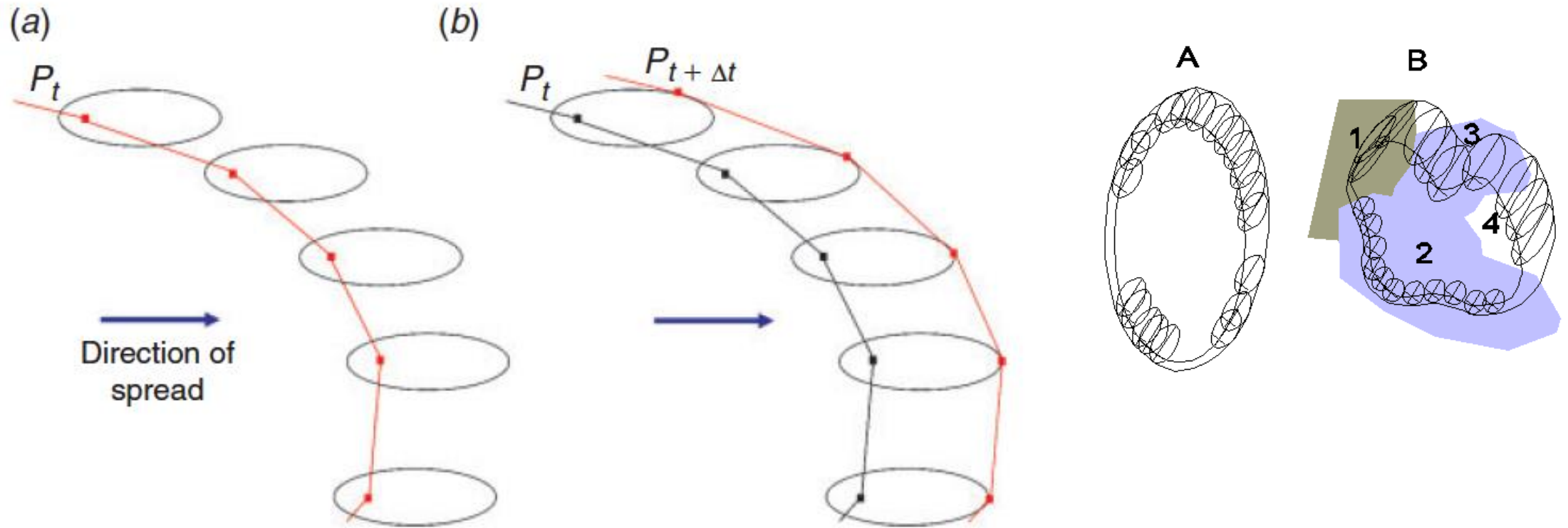
Wektorowe rozprzestrzenianie metodą falkową Huygensa

- Anderson i in. (1982) sformalizowali tę koncepcję, używając elipsy do zdefiniowania kształtu nowych pożarów z długą osią ustawioną w kierunku wiatru.
- Kształty elipsy zostały użyte do opisanie ognia rozprzestrzeniającego się w kilku rodzajach paliwa.



$a + c$ jest definiowane na podstawie prędkości rozprzestrzeniania
 b opisuje propagację boczną

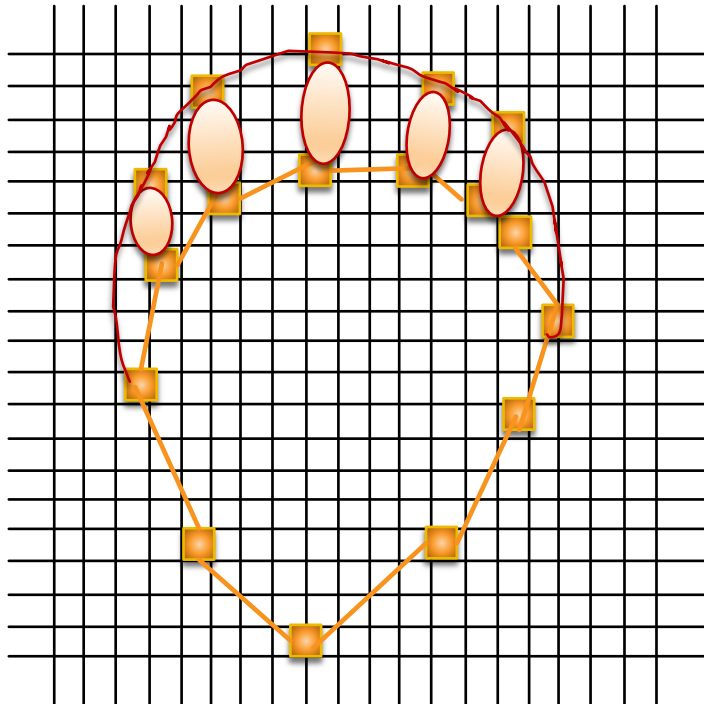
Wektorowe rozprzestrzanie metodą falkową Huygensa



Wektorowe rozprzestrzanie metodą falkową Huygensa

Nowy obwód jest przybliżony jako przedłużenie poprzedniego frontu pożarowego wykonywanego za pomocą elips zgodnie metodą Huygensa

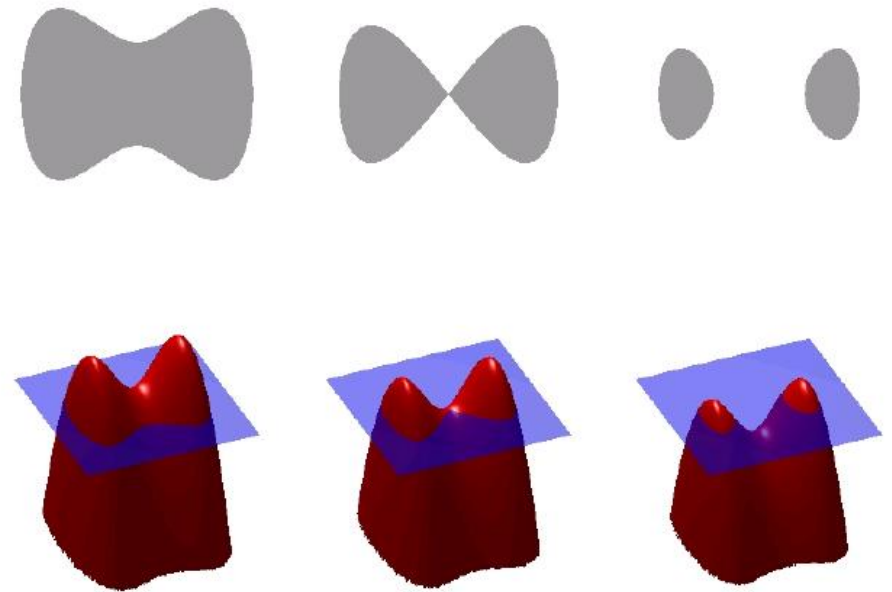
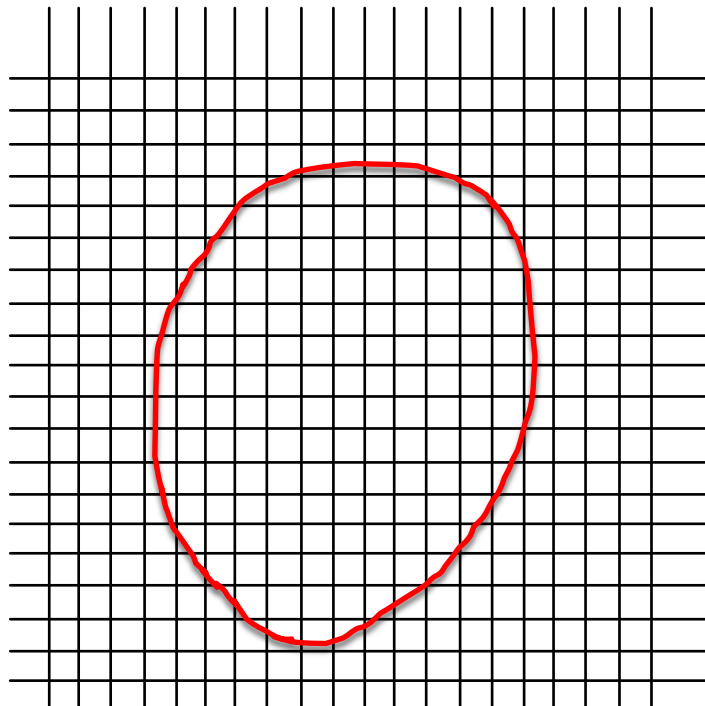
Fire ARea SimulaTor FARSITE simulation based on the Rothermel model



Reprezentacja frontu funkcją metodą poziomnic

3. Metoda poziomnic

Metoda pozwalająca na śledzenie powierzchni w przestrzeni trójwymiarowej ewoluującej pod wpływem pewnego pola prędkości zdefiniowanego w jej punktach.

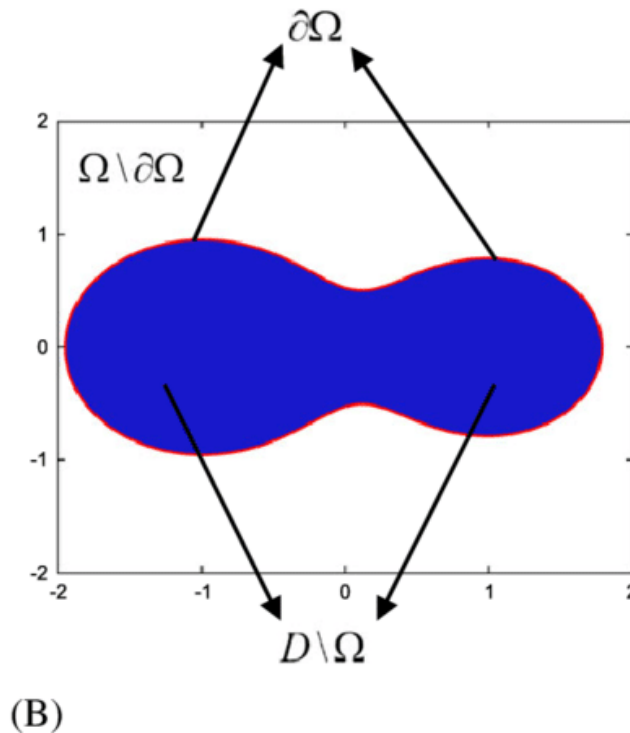
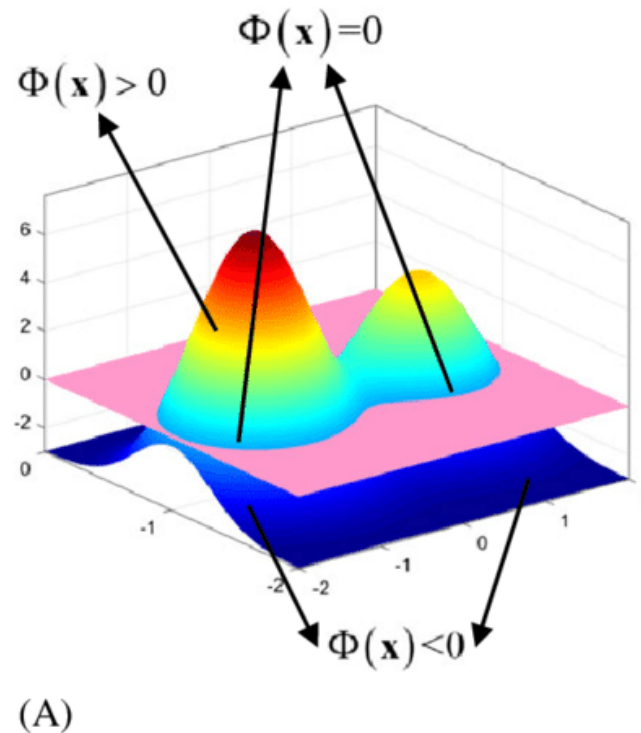
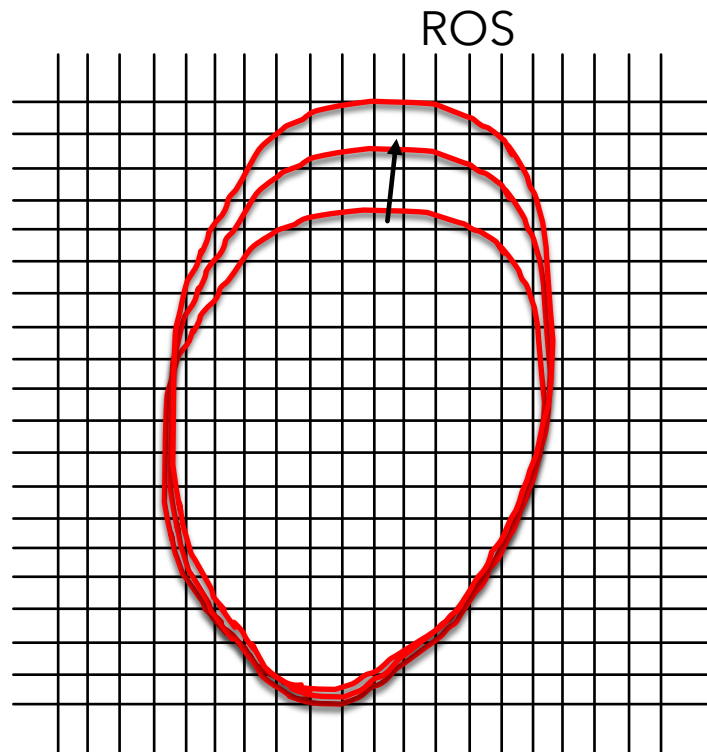


Metoda poziomnic

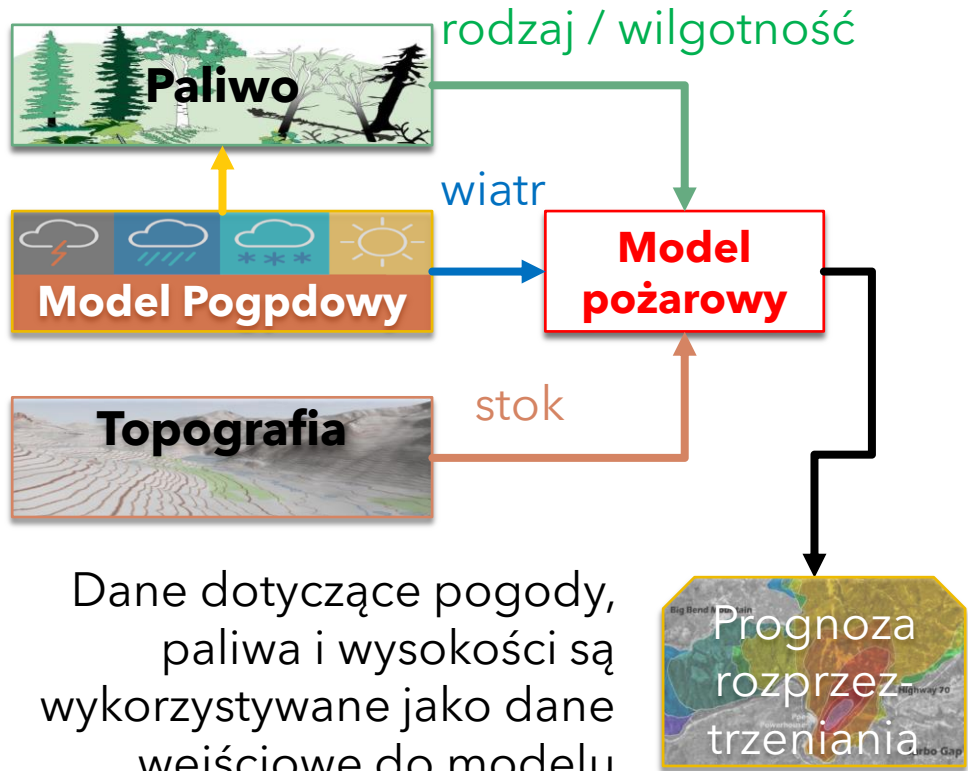
Reprezentacja frontu funkcją metodą poziomnic

3. Metoda poziomnic

Obwód pożaru jest traktowany jako zamknięta funkcja sprężysta, która jest rozciągana (odkształcana) w dowolnym kierunku pod wpływem prędkości propagacji frontu (ROS) obliczonej w kierunku normalnym do tej funkcji.



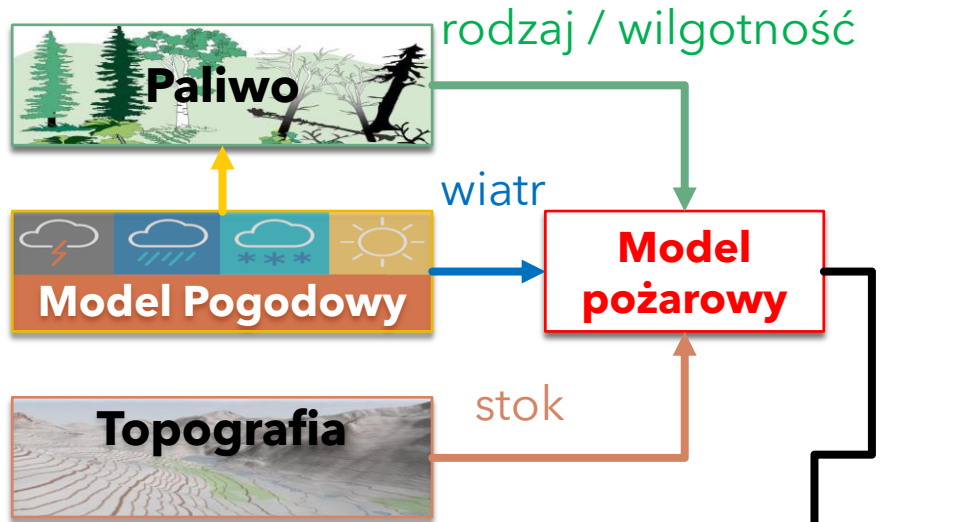
NIESPRZĘŻONE MODELOWANIE POŻARU



Dane dotyczące pogody, paliwa i wysokości są wykorzystywane jako dane wejściowe do modelu pożaru, ale nie ma sprzężenia zwrotnego między pożarwm a pogodą

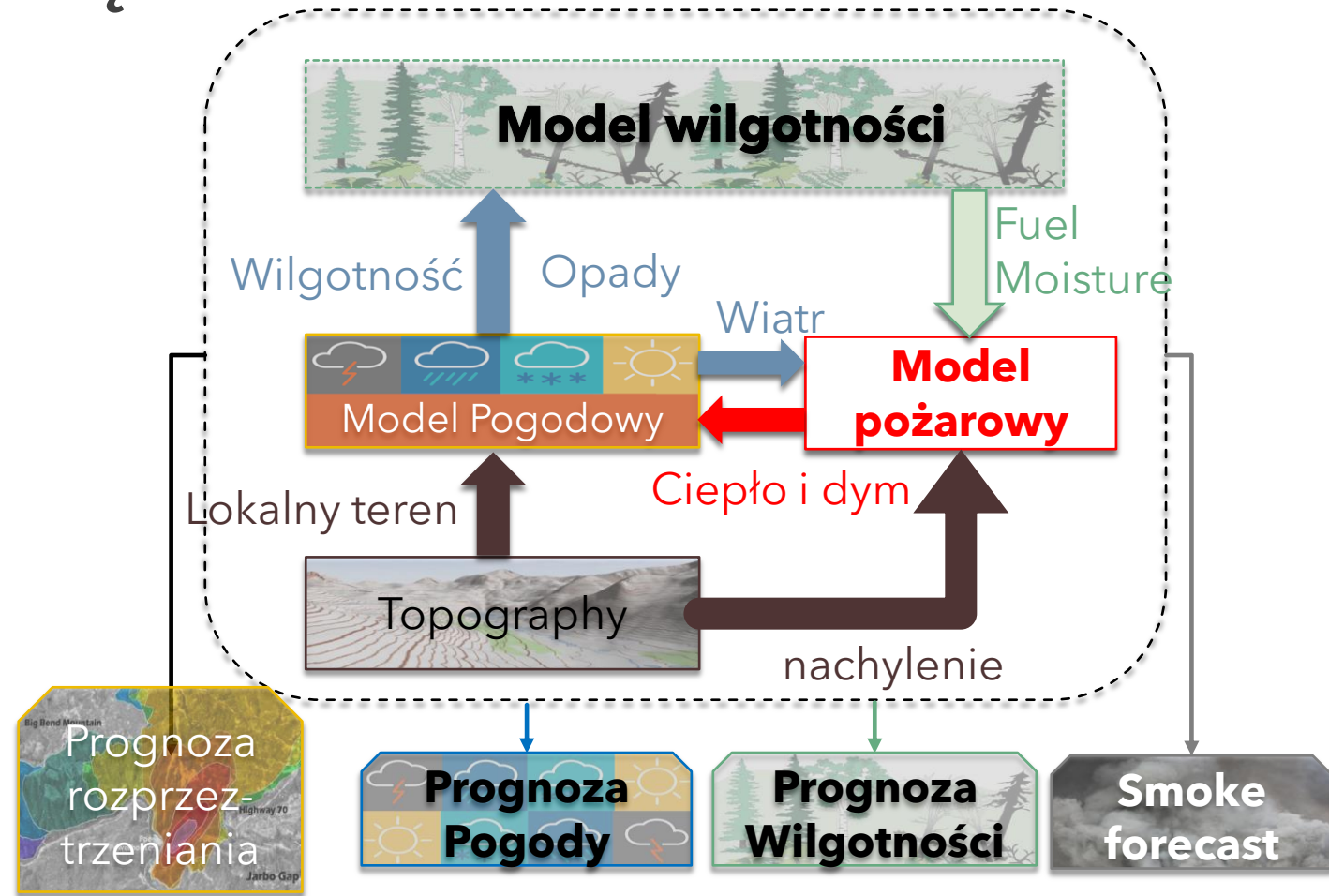
Behave, Farsite, Prometheus, FSPro...

NIESPRZĘŻONE VS. SPRZĘŻONE MODELOWANIE POŻARU



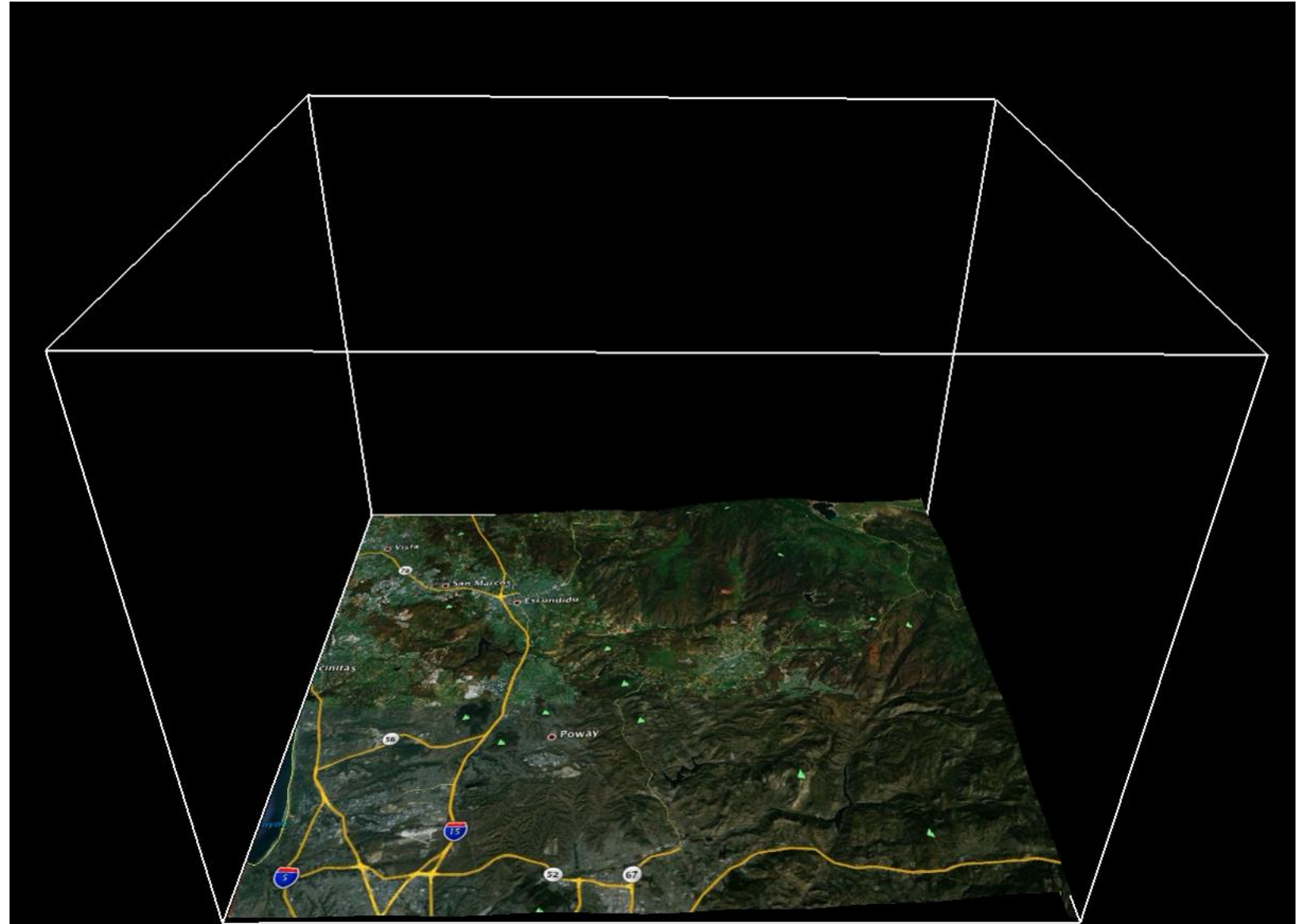
Dane dotyczące pogody, paliwa i wysokości są wykorzystywane jako dane wejściowe do modelu pożaru, ale nie ma sprzężenia zwrotnego między pożarwm a pogodą

Behave, Farsite, Prometheus, FSPro...



Sam pożar wpływa na lokalną pogodę poprzez uwalnianie ciepła i dym. Lokalne warunki pogodowe spowodowane pożarem napędzają wilgotność paliwa i rozprzestrzenianie się ognia

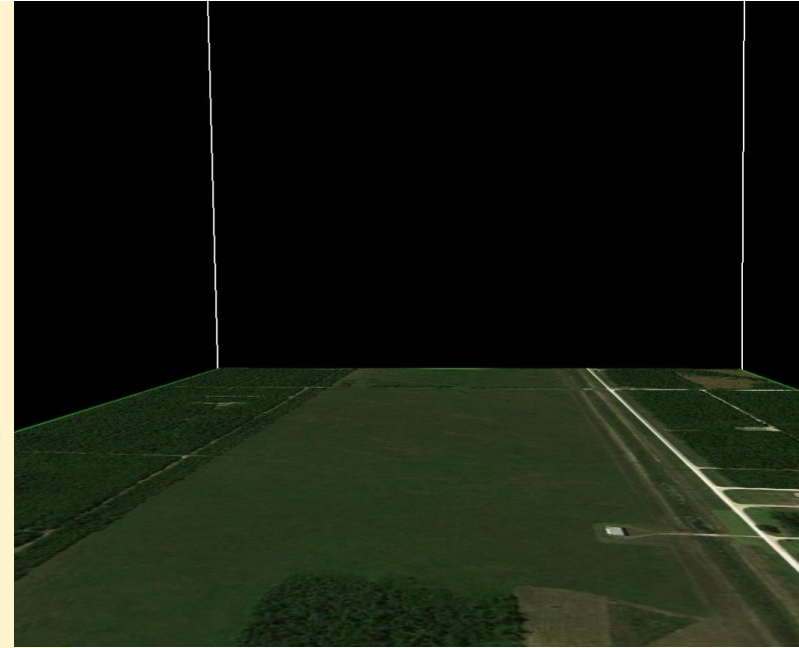
Przykład symulacji sprzężonej wykorzystującej metodę poziomą i model Rothermel'a



Požary Witch and Guejito zasymulowane modelem sprzężonym WRF-SFIRE.

Co dzisiaj omówiliśmy

- Proces spalania
- Rolę pirolizy i spalania w fazie gazowej
- Podstawy modeli doświadczalnych
- Podstawy modelu Rothermela
- Sposoby reprezentacji frontu pożarowego
- Sposoby propagacji frontu pożarowego
- Sprzężone i niesprzężone modele pożarowe



Eksperyment FireFlux 2 zasymulowany modelem sprzężonym WRF-SFIRE.