

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA  
STASZICA

KRAKÓW

---

# Symulator pożaru lasu

---

*Autorzy:*

Marcin JĘDRZEJCZYK

Sebastian KATSZER

Katarzyna KOSIAK

14 grudnia 2015

# Spis treści

<b>1 Wstęp</b>	<b>2</b>
<b>Cele modelowania pożaru</b>	<b>2</b>
<b>Czynniki środowiskowe</b>	<b>2</b>
<b>Podejścia do modelowania pożaru</b>	<b>2</b>
1.1 Model paliwowy . . . . .	3
<b>Sztandarowe modele</b>	<b>3</b>
1.2 Rothermel - szybkość rozchodzenia się linii pożaru . . . . .	3
1.2.1 Ciepło przed zapłonowe . . . . .	4
1.2.2 Efektywność ogrzewania . . . . .	4
1.2.3 Strumień ciepła . . . . .	4
1.2.4 Współczynnik wiatru, nachylenia . . . . .	5
1.3 Rothermel - szybkość rozprzestrzeniania się pożaru w koronach . . . . .	5
1.4 Van Wagner - intensywność linii ognia . . . . .	5
1.5 Cruz - szybkość rozprzestrzeniania się pożaru w koronach . . . . .	5
1.6 Modele oparte na automatach komórkowych . . . . .	5
<b>2 Zastosowany model</b>	<b>7</b>
<b>Cele symulacji</b>	<b>7</b>
<b>Dane wejściowe</b>	<b>7</b>
<b>Sąsiedztwo</b>	<b>7</b>
<b>Modele paliwowe</b>	<b>7</b>
<b>Cele symulacji</b>	<b>7</b>
<b>Podsumowanie</b>	<b>8</b>
<b>3 Walidacja</b>	<b>8</b>
<b>4 Testy</b>	<b>8</b>
<b>5 Wnioski</b>	<b>11</b>
<b>6 Literatura</b>	<b>11</b>

# 1 Wstęp

Niniejszy dokument stanowi opis zagadnienia symulowania pożarów lasów wraz z prezentacją symulatora rozprzestrzeniania się pożaru lasu opartego na automatach komórkowych.

## Cele modelowania pożaru

Modelowanie pożaru polega na próbie odtworzenia zachowania się ognia i poznaniu jego parametrów w zadanej sytuacji - m.in. szybkości rozprzestrzeniania się, kierunku i ilości wydzielanego ciepła, estymację skutków pożaru. Na parametry te mają oczywiście wpływ ilość, rodzaj i dokładność dostarczonych danych wejściowych, z których najważniejszym jest rodzaj paliwa.

Istniejące modele paliwowe definiują zestawy cech roślinności mających wpływ na ich palność. Najbardziej znane modele pożaru korzystają z głównych systemów klasyfikacji modeli paliwowych takich jak dynamiczne modele Scotta i Burgana czy trzynaście "oryginalnych" modeli paliwowych Andersona i Albiniego, które opisują roślinność w czasie pory suchej, kiedy to stopień zagrożenia pożarowego jest najwyższy. Zwiększa to trafność i przydatność symulacji pożarów podczas organizacji akcji pożarowych.

## Czynniki środowiskowe

Na pożar lasu wpływ mają takie czynniki jak pogoda, charakterystyka paliwa i topografia terenu.

Pogoda wpływa na ogień poprzez kierunek i siłę wiatru oraz wilgotność powietrza. Mokre paliwo potrzebuje więcej dostarczonej energii, by nastąpił jego zapłon. Ilość potrzebnej energii zależy również od temperatury otoczenia.

Topologia ma znaczący wpływ na przebieg pożaru lasu. Jeżeli las jest na terenie pochyłym to ogień będzie rozprzestrzeniał się szybciej z dołu do góry niż odwrotnie, a to dzięki wstępnemu ogrzaniu drzew położonych wyżej. Dochodzi do tego jeszcze nasłonecznienie stoku. Jeśli drzewa są dobrze nasłonecznione oznacza to, że dostarczono im więcej energii, co przekłada się na ich szybszy zapłon niż drzew z zacienionego obszaru. Ukształtowanie terenu ma też wpływ na wiatr. Obecność gór, wąwozów oraz przełęczy zmienia przepływ powietrza. Ponadto mogą wystąpić bariery dla ognia takie jak drogi, uskoki w ziemi, rzeki, bagna, jeziora, które zatrzymują rozprzestrzenianie się ognia.

Wiatr działa na pożar na parę sposobów. Dostarcza tlen potrzebny podczas spalania. Zmniejsza wilgotność paliwa przez zwiększenie parowania. Także fizycznie przesuwając ogień i ciepło zwiększając zasięg pożaru. Co więcej jest odpowiedzialny za "spotting" (z ang.), czyli transport płonących kawałków drzew i niedopałków dalej w teren.

Paliwo pożaru to trawy, krzewy oraz wszystko inne co może się spalić. Drobne rzeczy zapalają się szybciej, a wielkie wolniej, ale też dostarczają różną ilość ciepła zależy - to od kaloryczności materiału, który płonie. Paliwo ma także wpływ na to w jaki sposób rozprzestrzenia się ogień. Dzięki wyższej roślinności możliwa wysokość słupa ognia naturalnie się zwiększa.

## Podejścia do modelowania pożaru

Od powstania pierwszych modeli pożarów w latach czterdziestych XX wieku minęło wiele czasu, w ciągu którego zaprezentowano kolejne - zróżnicowane pod względem wymaganych danych wejściowych, znaczących czynników i stopnia rozbudowania - modele.

Problemem związanym z modelowaniem tak skomplikowanego zjawiska jak ogień jest rosnąca wraz z ilością branych pod uwagę czynników liczba koniecznych do wykonania obliczeń, a co za tym idzie - potrzeba coraz większej mocy obliczeniowej. Właśnie z powodu względnie długiego czasu symulacji i potrzeby dużej ilości danych wejściowych skomplikowane modele stosuje się częściej w badaniu niż w terenie. W związku z tym w istniejących modelach zastosowano różne uproszczenia, często poświęcając mniej znaczące czynniki na rzecz przyspieszenia obliczeń.

Modele pożaru można podzielić na trzy grupy: empiryczne (model kanadyjski i australijski), semi-empiryczne (automaty komórkowe i Rothermel) i oparte na fizyce (modelowanie ognia koron oraz pełne fizyczne i multifazowe podejście).

## 1.1 Model paliwowy

Model paliwowy jest to zbiór możliwych paliw, typów roślinności i ich własności, które są reprezentowane w postaci parametrów. Parametry te wykorzystywane są następnie jako dane wejściowe dla zastosowanego modelu.

Pierwszy taki zbiór wprowadził Rothermel, który rozróżnił 11 różnych paliw - od krótkiej trawy po powalone drzewa - których właściwości utrzymują się na stałym poziomie właściwości cząstek w czasie. Zbiór ten został rozszerzony o dwa modele paliw przez Albiniego, a następnie opisany przez Andersena. Wraz z czasem powstały bardziej rozbudowane zestawy. Narodziły się dynamiczne modele paliwowe.

## Sztandarowe modele

Poniżej znajduje się krótki przegląd kilku wartych uwagi modeli. Wszystkie wymienione miały znaczącą rolę w rozwoju zagadnienia modelowania pożaru lub są uznawane za najdokładniejsze dla zadanego czasu oczekiwania na rozwiązanie i używane są w najpopularniejszych profesjonalnych programach do symulacji pożaru jak na przykład Farasite, Prometheus czy BEHAVE, które dzięki swojej zdolności do oszacowywania zachowań ognia w czasie rzeczywistym demonstrują wielką użyteczność w terenie.

## 1.2 Rothermel - szybkość rozchodzenia się linii pożaru

Pierwszy matematyczny model dla symulacji pożaru, został opublikowany w 1972 roku przez Richarda Rothermela.

Przybliżone równanie na szybkość rozchodzenia się linii pożaru ma formę:

$$R = \frac{(I_P)_0(1 + \phi_W + \phi_S)}{\rho_b \epsilon Q_{ig}}$$

gdzie:

$R$  - szybkość rozchodzenia się linii pożaru [m/min]

$(I_P)_0$  - strumień ciepła dla warunków bezwietrznych [kJ/m<sup>2</sup>/min]

$\rho_b$  - gęstość drewna całkowicie suchego [kg/m<sup>3</sup>]

$\epsilon$  - efektywność ogrzewania

$Q_{ig}$  - ciepło przed-zapłonowe [kJ/kg]

$\phi_w$  - współczynnik wiatru

$\phi_s$  - współczynnik nachylenia

### 1.2.1 Ciepło przed zapłonowe

$Q_{ig}$  - ciepło przed-zapłonowe [kJ/kg]

Ciepło przed zapłonem jest to energia w przeliczeniu na jednostkę masy, która jest potrzebna do zapłonu. Obliczane jest na podstawie zmian ciepła właściwego z otoczenia, temperatury zapłonu, jak i ciepła utajonego wyparowywania wilgoci .

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

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.

Po przeliczeniu:

$$Q_{ig} = 250 + 1,116M_f$$

### 1.2.2 Efektywność ogrzewania

Jest to stosunek efektywnej gęstości, czyli ilość paliwa, które bierze udział w zapłonie  $p_{be}$ , do rzeczywistej gęstości paliwa  $p_b$

$$\epsilon = \frac{p_{be}}{p_b}$$

Dana ta została wyliczona eksperymentalnie przez Rothermela i dla "dobrych paliw" przyjmuje wartość bliską jeden, a wraz ze wzrostem rozmiarów paliwa będzie maleć do 0.

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

gdzie:

$\sigma$  - iloraz powierzchni i objętości cząsteczki paliwa. Dla paliw o kształcie walca współczynnik ten może przyjąć wartość:

$$\epsilon = \frac{4}{d}$$

gdzie:

$d$  - Jest średnicą paliw okrągłych lub długością krawędzi przekroju kwadratowego.

### 1.2.3 Strumień ciepła

Czynnik  $I_p$  określa, w jaki sposób rozchodzi się strumień ciepła. Składa się on z poziomego jak i pionowego strumienia. Istota wertykalnego strumienia pojawia się w momencie wiania wiatru, który to powoduje przechylenie się płomienia, powodując wzrost promieniowania podczerwonego. W modelu bezwietrznym pozostaje podstawowy, horyzontalny wektor  $(I_p)_0$ , który to może zostać wyliczony eksperymentalnie w bezwietrznych warunkach.

#### 1.2.4 Współczynnik wiatru, nachylenia

Współczynniki te reprezentują dodatkowe strumienie ciepła, które tworzone są przez dodatkowe warunki jakimi są siła wiatru i ukształtowanie terenu. Są to bezwymiarowe współczynniki, wyliczane w sposób eksperymentalny.

### 1.3 Rothermel - szybkość rozprzestrzeniania się pożaru w koronach

Równanie opisujące szybkość rozprzestrzeniania się pożaru w koronach:

$$R_{active} = 3.34(R_{10})_{40\%}$$

gdzie:

$R_{active}$  - szybkość rozprzestrzeniania się pożaru w koronach [m/min]

$R_{10}$  - szybkość rozchodzenia się linii pożaru dla 10. modelu paliwowego i prędkość wiatru na wysokości połowy płomieni równa 40% prędkości wiatru na wysokości 6,1m. [m/min]

### 1.4 Van Wagner - intensywność linii ognia

Van Wagner zaproponował inne podejście do zagadnienia rozprzestrzeniania się pożaru. Równanie opisujące intensywność linii ognia wymaganą do dalszego przeniesienia się ognia:

$$I_{initiation} = \left( \frac{CBH(460 + 25.9FMC)}{100} \right)^{\left(\frac{3}{2}\right)}$$

gdzie:

$I_{initiation}$  - intensywność linii ognia wymaganą do dalszego przeniesienia się ognia [J/m]

CBH - podstawowa wysokość roślinności [m]

FMC - wilgotność roślinności (podłoża i drzew)

### 1.5 Cruz - szybkość rozprzestrzeniania się pożaru w koronach

Zaproponowane w 2002 roku przez Cruza równanie na szybkość rozprzestrzeniania się pożaru w koronach:

$$CROS_A = \beta_1 U_1^{\beta_2} \times CBD^{\beta_3} \times e^{-\beta_4 EFFM}$$

gdzie:

$EFFM$  - estymowana wilgotność paliwa

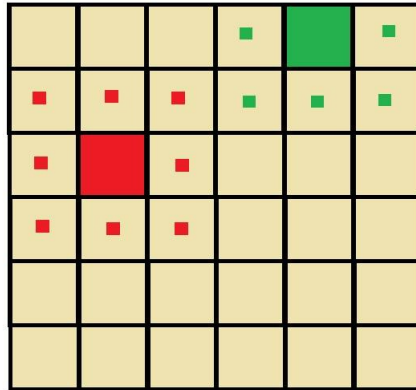
$CBD$  - gęstość grupy roślinności [1/m<sup>3</sup>]

$U_{1010} - m$  - prędkość wiatru ponad najwyższą roślinnością [m/min]  $\beta_1, \dots, \beta_4$  - współczynniki regresji

### 1.6 Modele oparte na automatach komórkowych

Automat komórkowy to system składający się z pojedynczych komórek, które znajdują się jedna obok drugiej na n-wymiarowej siatce. Każda z komórek może mieć w danej chwili jeden stan z wielu. Stany komórki zmieniają się zgodnie z regułami przejść i zależą od stanu jej sąsiadów. Czas i przestrzeń są dyskretne.

Automaty komórkowe tworzą środowisko dla większych dyskretnych klas modeli.



Rysunek 1: Automaty komórkowe - przykładow prezentacji różnych stanów wraz z zaznaczonym sąsiedztwem Moore'a

## 2 Zastosowany model

### Cele symulacji

Zapoznanie się z metodami przeprowadzania symulacji i próba przeniesienia wiedzy teoretycznej na projekt praktyczny. Ponadto przetestowanie jak radzi sobie język Java w tego typu projektach oraz ile z właściwości tego języka jesteśmy w stanie tu użyć.

### Dane wejściowe

Zanim uruchomimy symulację należy, wybrać/podać:

- wielkość powierzchni,
- roughness,
- maksymalną wysokość,
- gęstość zalesienia,
- typ lasu,
- prędkość wiatru,
- kierunek w którym wieje wiatr,
- wilgotność powietrza.

Po czym kliknąć przycisk GENERATE.

Przycisk GENERATE EXAMPLE jest odpowiedzialny za podstawienie danych testowych i wygenerowanie dla nich symulacji.

## Sąsiedztwo

W naszym projekcie sąsiedztwo wyliczane jest na podstawie szybkości rozchodzenia się pożaru ze wzoru Rothermela, który to uwzględnia również współczynniki wiatru i nachylenia. Zastosowana została zasada Huygensa, która to zakłada, że każdy wierzchołek może być źródłem nowej eliptycznej ekspansji ognia. W związku z tym, sąsiedztwo komórki jest wygenerowane z elipsy. Jej kształt jest zgodny z zależnością odkrytą przez Andersona, przy założeniu, że pożar rośnie w kształcie pojedynczej elipsy, zgodnie z założeniami modelu Alexandra. Fizycznie tworzona jest ona w układzie współrzędnych biegunowych, gdzie zostaje obrócona wraz z kierunkiem wiania wiatru. Następnie jest ona rzutowana na rzeczywiste położenie komórki i poddana dyskretyzacji.

Może jakiś wzór tu wałnąć??

## Modele paliwowe

Tu wymieniamy jakie są i że my mamy te 3 czy jak.

W naszym programie jest możliwość wyboru modelu paliwowego. Do wyboru mamy las iglasty, liściasty, mieszany.

## Cele symulacji

to nam raczej nie potrzebne jest, bo parę stron wcześniej jest to lepiej napisane( skapłem się po chwili)

Celem symulacji jest próba przewidzenia jak zachowuje się pożar lasu. Dzięki temu można podjąć decyzję, jak rozdysponować środki w czasie walki z żywłem w sposób optymalny oraz ostrzec o obszarach zagrożonych. Można też spróbować przewidzieć jak zachowałby się przyszły teoretyczny pożar, co pozwoliłoby zawczasu podjąć akcje zapobiegawcze.

## *f* fancy function podtytuł

## Podsumowanie

### 3 Walidacja

Walidacja – w naukach technicznych i informatyce działanie mające na celu potwierdzenie w sposób udokumentowany i zgodny z założeniami, że procedury, procesy, urządzenia, materiały, czynności i systemy rzeczywiście prowadzą do zaplanowanych wyników.

Do walidacji wykorzystaliśmy, jako punkt odniesienia pożar Kuźni Raciborskiej w 1992 roku. Informacje z materiałów źródłowych o tym pożarze to m.in.:

- Klimat umiarkowany, kontynentalny z wpływem atlantyckiego,
- Średnia roczna opadów 650mm w części północnej, 660mm w części południowej, 500mm ostatniego lata,



- Udział drzew iglastych(sosna, świerk) w powierzchni- 85%,
- Udział drzew liściastych(głównie dąb,buk, brzoza) w powierzchni- 15%,
- Wiatr południowo-zachodni,
- Wiek drzew: do 20 lat - 15%, do 40 lat 18%, starsze 67%,
- Teren nizinny, płaski, bez wyraźnych wzgórz czy znacznych różnic wysokości terenu,
- Temperatura w dniu pożaru wynosiła  $34^{\circ}C$ , a wcześniej nawet do  $40^{\circ}C$ ,
- Większość warstwy podłoża to niezmineralizowana ściółka lub zbutwiałe drzewa oraz rośliny o grubości kilkunastu cm,
- Obecność torfu o grubości 1-1.5m, który zajmował około 150ha obszaru.

## 4 Testy

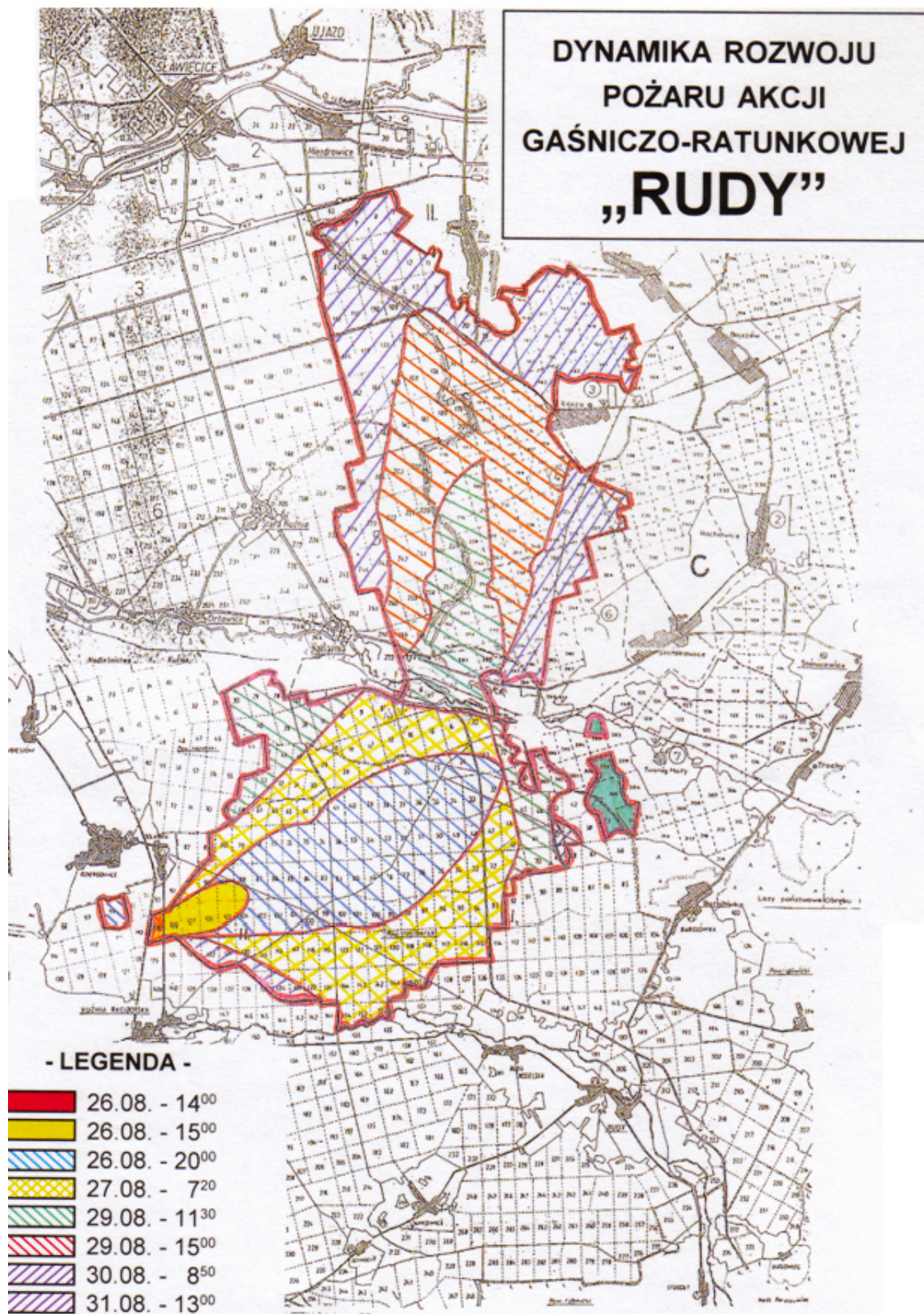
sd

## 5 Wnioski

sdsd

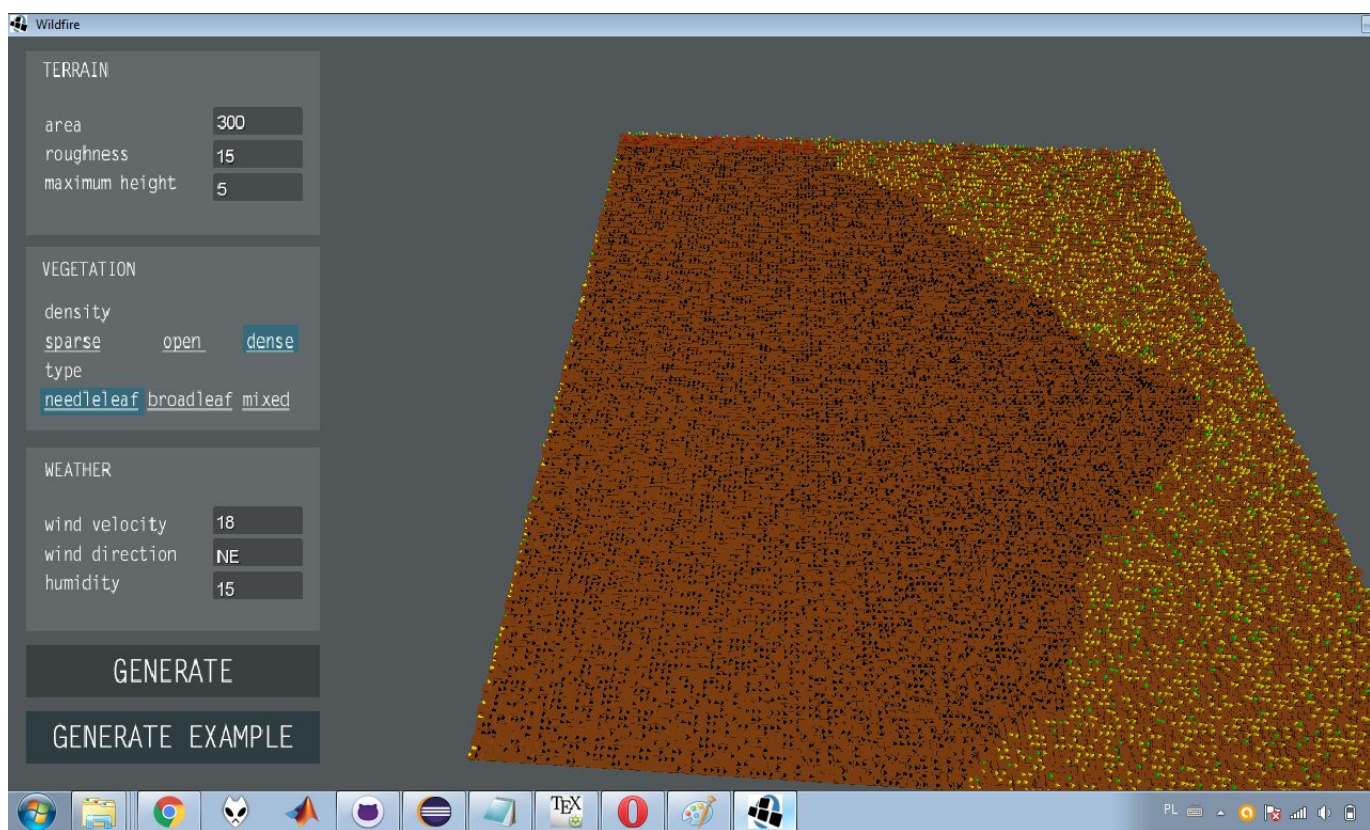
## 6 Literatura

- Asensio MI, Ferragut L., Simon J.:** Modelling of convective phenomena in forest fire. Rev Real Academia de Ciencias, 2002, 96:299–313
- Bodrožić Ljiljana, Stipaniev Darko, Šerić Marijo:** Forest fires spread modeling using cellular automata approach, University of Split, 21000 Split, Croatia, 2009
- Chad Hoffman:** Fire Behavior Predictions Case Study, University of Idaho, 2007
- Czerpak Tomasz, Maciak Tadeusz:** Modelowanie pożaru lasu. Część 1. Metody i algorytmy modelowania pożaru lasu, Wydział Informatyki, Politechnika Białostocka, 2011
- Kuśkowski Krzysztof:** Automaty Komórkowe, OEN AGH (2000)
- Law A.M., Kelton W.D.:** Simulation Modeling and Analysis, Second Edition, McGraw-Hill 2000
- Ottmar Roger D. et al.:** An Overview of the Fuel Characteristic Classification System - Quantifying, Classifying, and Creating Fuel beds for Resource Planning. Canadian Journal of Forestry Research. 37:2383-2393. 2007
- Rothermel Richard C.:** A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels. USDA Forest Service. Research Paper INT-115. 1972.
- Sayama Hiroki:** Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems, Open SUNY Textbooks, State University of New York at Geneseo, 2015
- Scott Joe H.,Burgan Robert E.:** Standard Fire Behavior Fuel Models, USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153., June 2005
- Weise David R., Biging Gregory S.:** A Qualitative Comparison of Fire Spread Models Incorporating Wind and Slope Effects, Research Gate, October 2015
- Wells Gail:** The Rothermel Fire-Spread Study: Still Running Like a Champ, Fire Science Direct, Issue 2, March 2008



Rysunek 2: pożar Kuźni Raciborskiej





Rysunek 3: Wynik naszego programu dla danych z Kuźni