



Centrum
Modelowania
Meteorologicznego



Czy to pogoda kieruje pożarem czy raczej odwrotnie? czyli Jak pożar modyfikuje pogodę?

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

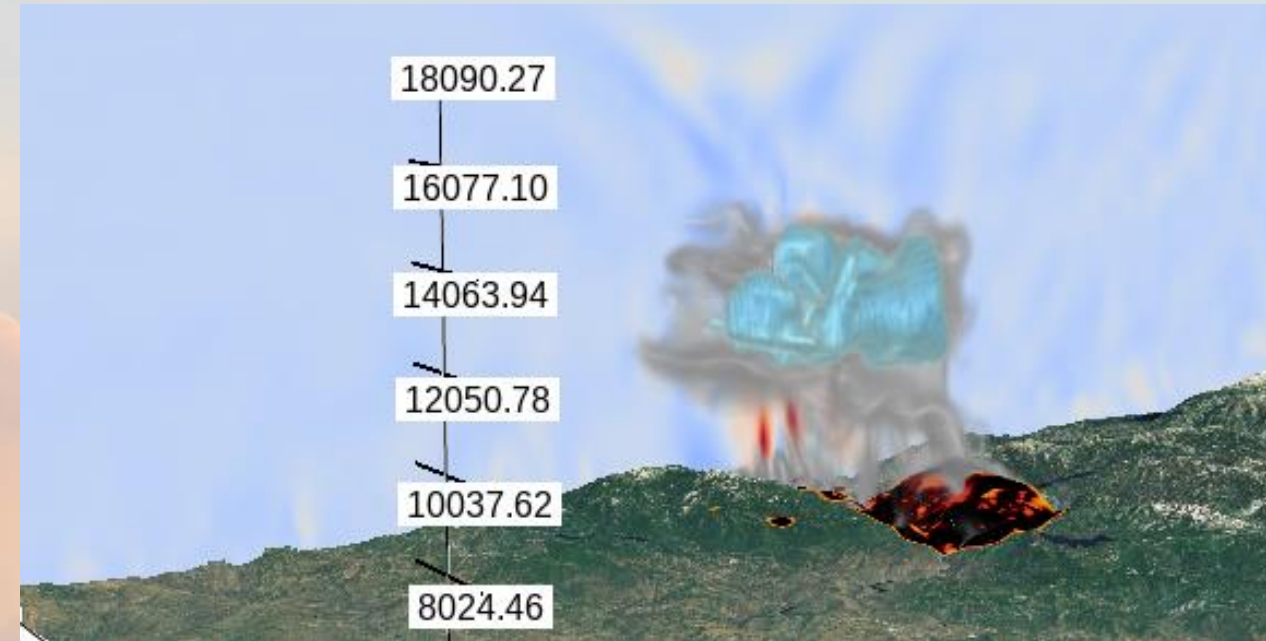
Adam Kochanski

SJSU

WILDFIRE INTERDISCIPLINARY
RESEARCH CENTER



- Ciepło generowane przez pożar
- Dlaczego wpływ pożaru na lokalne warunki pogodowe jest ważny
- Przykład obserwacji cyrkulacji pożarowej (wiatru wygenerowanego przez pożar) w warunkach słabego wiatru
- Przykład obserwacji cyrkulacji pożarowej w średnich warunkach wiatrowych
- Odwrócenie typowego logarytmicznego profilu prędkości wiatru
- Efekty pożaru w trakcie dużych incydentów
- Wpływ dymu na warunki atmosferyczne
- Sprzężenie zwrotne między dymem a warunkami atmosferycznymi
- Modyfikacja temperatury i wiatru z dala od pożaru



- Pożary generują olbrzymie ilości ciepła.
- Ciepło generowane przez pożar powoduje intensywne prądy wznoszące które unoszą dym na duże wysokości
- Unoszące się do góry masy gorącego powietrza obniżają ciśnienie w okolicy pożaru i generują napływ powietrza do podstawy kolumny dymu
- Ten mechanizm zwany kominowym generuje dodatkowy wiatr który modyfikuje warunki atmosferyczne bezpośrednio w okolicy pożaru (wiatr pożarowy)
- Dodatkowo jednak, pirokwekcja może wywołać opady atmosferyczne, a blokowanie nasłonecznienia przez dym, zmienia temperaturę i wiatr nawet z dala od pożaru

Ogień tworzy własne środowisko z lokalnymi wiatrami innymi niż otaczające, mierzonymi w pewnej odległości od ognia



Ile ciepła generuje pożar?

Policzmy:

Zacznijmy od energii chemicznej uchwyczonej w drewnie (ciepło spalania):

- Zazwyczaj jest to około 17×10^6 J/kg, czyli 17MJ/kg (megadżula na kilogram)

Pomyślmy teraz, ile mamy materiału palnego:

- Załóżmy ładunek paliwa w lesie wynosi około 1 kg/m^2

Przyjmijmy, że nasz pożar to 2 km na 2 km (4 km^2 , albo 400 hektarów)

- 4 km^2 , czyli $2000\text{m} \times 2000\text{m} = 4 \times 10^6 \text{ m}^2$

Teraz możemy obliczyć ilość paliwa na obszarze 4 km^2 jako:

Masa paliwa = Powierzchnia x Ładunek paliwa

- $4 \times 10^6 \text{ m}^2 \times 1 \text{ kg/m}^2 = 4 \times 10^6 \text{ kg}$ (4000 ton)

Teraz możemy obliczyć ilość uwolnionego ciepła, mnożąc masę paliwa przez jego stałą spalania:

- Ciepło = masa spalonego paliwa x Stała spalania
- Ciepło = $4 \times 10^6 \text{ kg} \times 17 \text{ MJ/kg} = 4 \times 10^6 \text{ kg} \times 17 \times 10^6 \text{ J/kg} = 68 \times 10^{12} \text{ J} = \mathbf{68 \text{ TJ}}$ (Terradżule)





Ile ciepła generuje pożar?

Czy 68TJ (Terradzuli) to dużo?

Tak, wyobraźcie sobie, że bomba atomowa użyta do zniszczenia Hiroszimy miała "tylko" **63TJ**.

Czyli 400 hektarowy pożar, uwalnia podobną ilość ciepła do małej bomby atomowej...



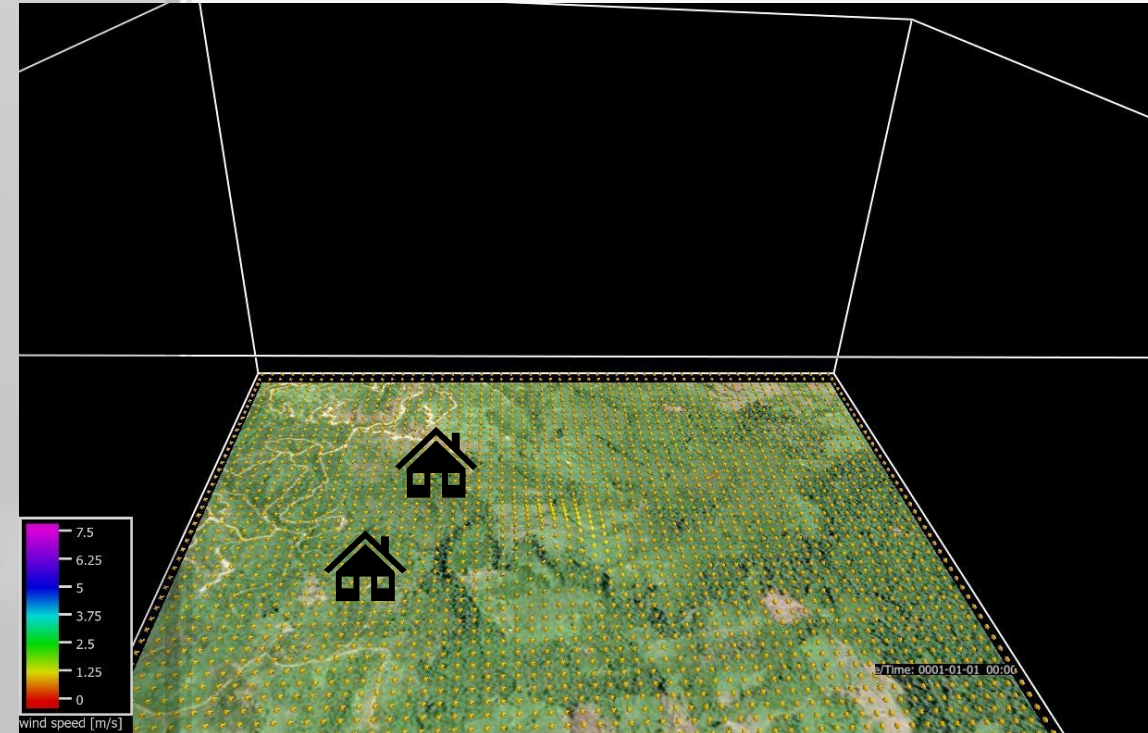
Picture from <https://science.howstuffworks.com/nuclear-bomb.htm>

Przykład lokalnej modyfikacji pogody przez pożar

Oto przykładowy scenariusz

- Prognoza pogody zapowiada bardzo słaby zachodni wiatr 3 km/h
- Wilgotność martwego paliwa wynosi około 12%
- Mały pożar traw rozpoczyna się około kilometra na wschód od łagodnego wzgórza o wysokości 100 m i 2 km na wschód od najbliższej zabudowań
- Opanowanie pożaru nie powinno stanowić specjalnego problem więc ryzyko jest minimalne

Czy aby napewno?

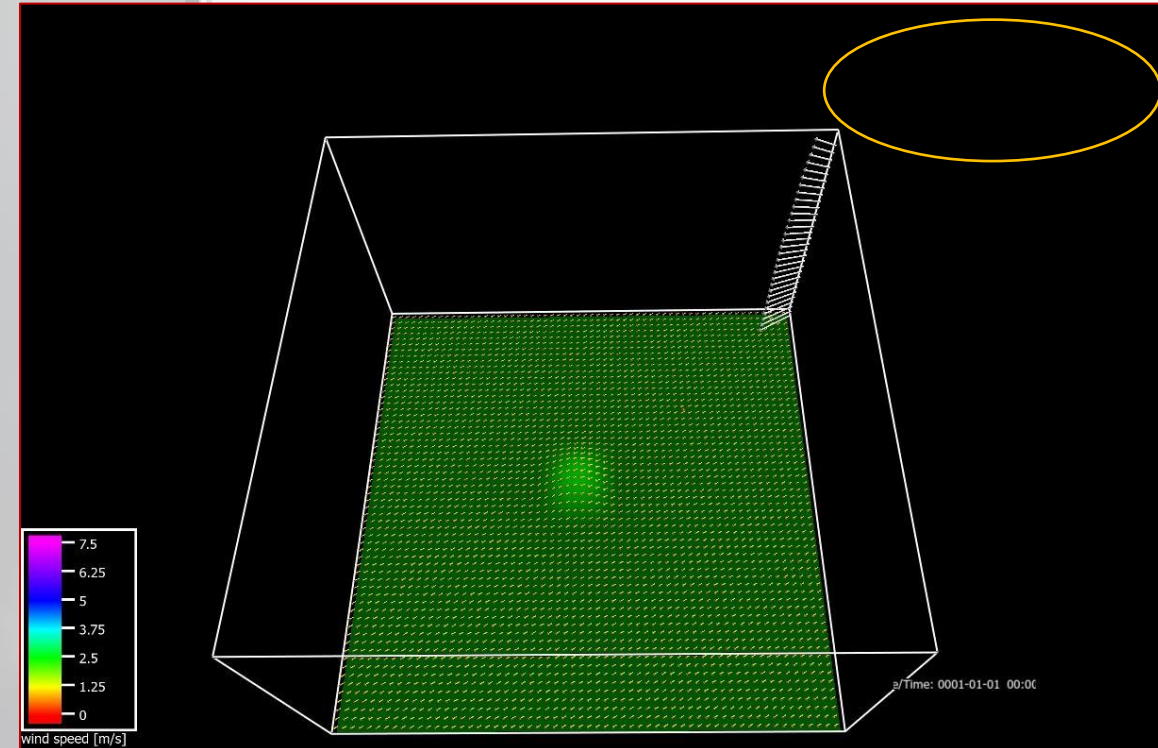


Przykład lokalnej modyfikacji pogody przez pożar

Oto przykładowy scenariusz

- Prognoza pogody zapowiada bardzo słaby zachodni wiatr 3 km/h
- Wilgotność martwego paliwa wynosi około 12%
- Mały pożar traw rozpoczyna się około kilometra na wschód od łagodnego wzgórza o wysokości 100 m i 2 km na wschód od najbliższej zabudowań
- Opanowanie pożaru nie powinno stanowić specjalnego problem więc ryzyko jest minimalne

Czy aby napewno?



Skąd to zaskakujące zachowanie pożaru?

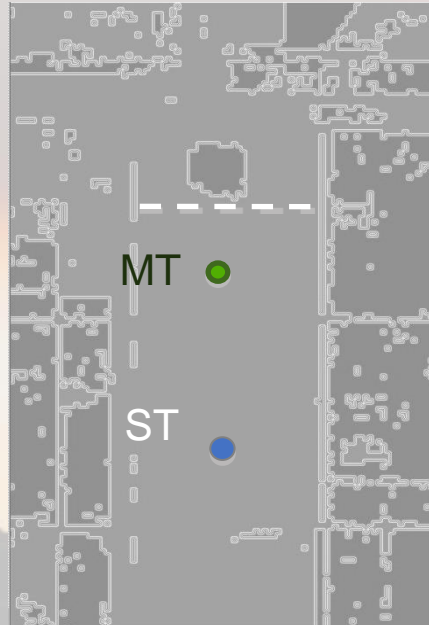
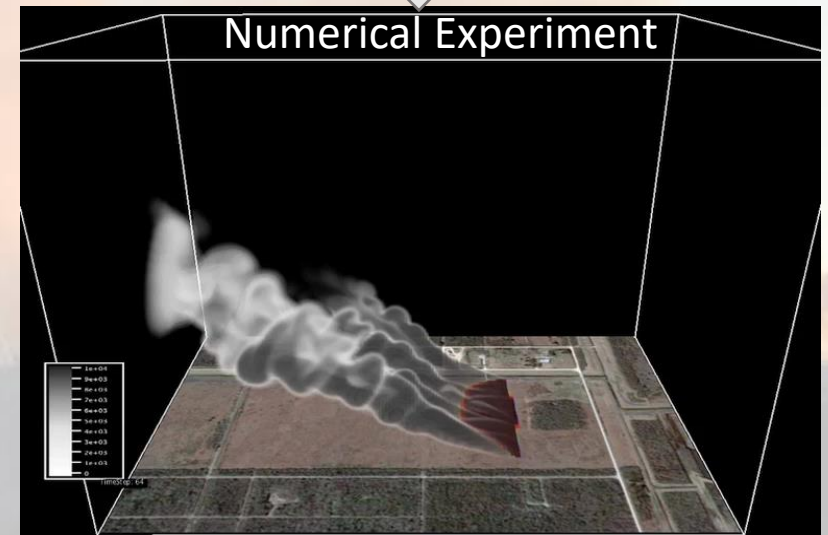
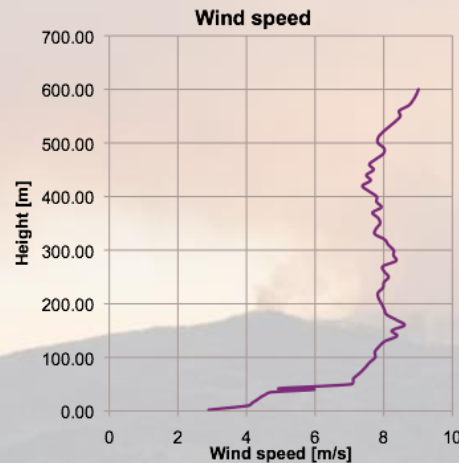
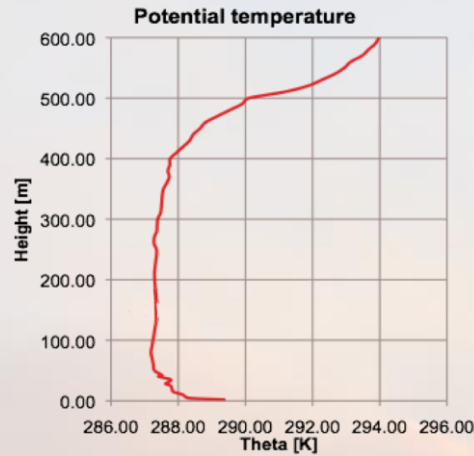
- Delikatna rotacja wiatru wraz z wysokością oraz wznoszenie spowodowane przez ciepło pożaru generuje wirującą kolumnę która wzmacnia wiatr i kontroluje rozprzestrzenianie pożaru
- W tym momencie wiatr wygenerowany przez sam pożar kontroluje jego rozprzestrzenianie



Badanie wiatru wywołanego pożarem traw

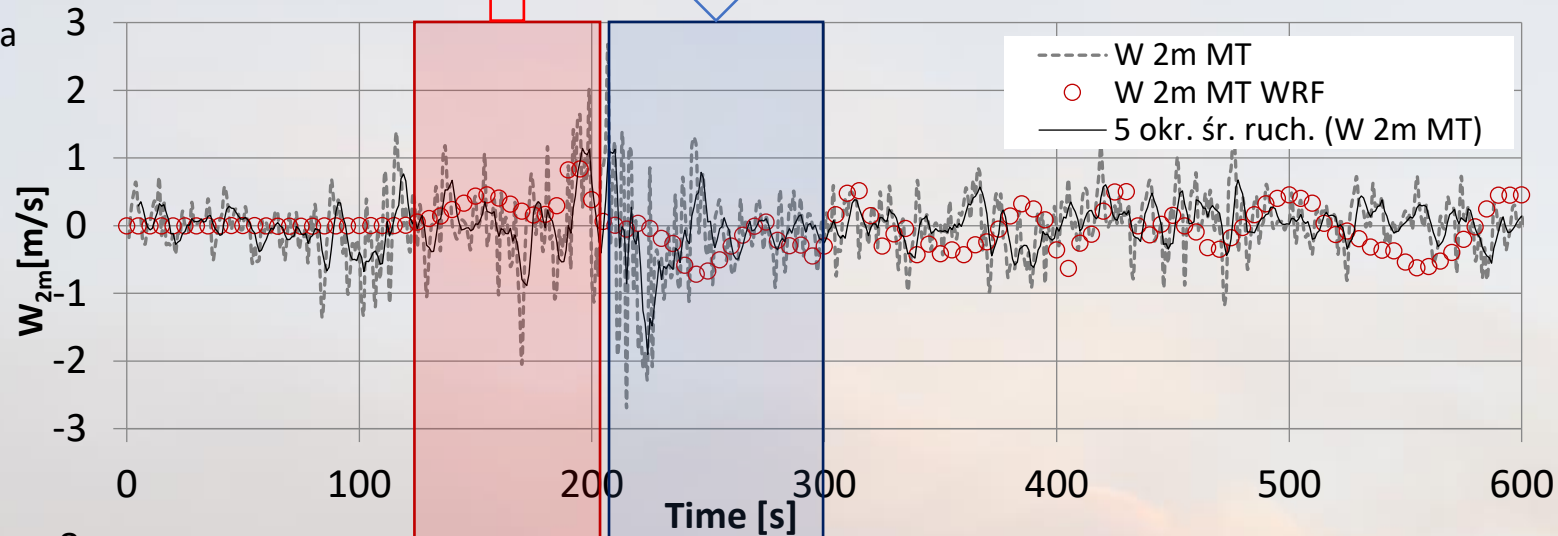
FireFlux – eksperymentalne wypalanie (0.63 km²) prerii Field Experiment

- Wieże meteorologiczne z anemometrami sonicznymi i termoparami
- Radiosonda i SODAR
- Charakteryzacja paliwa – wilgotność i ładunek



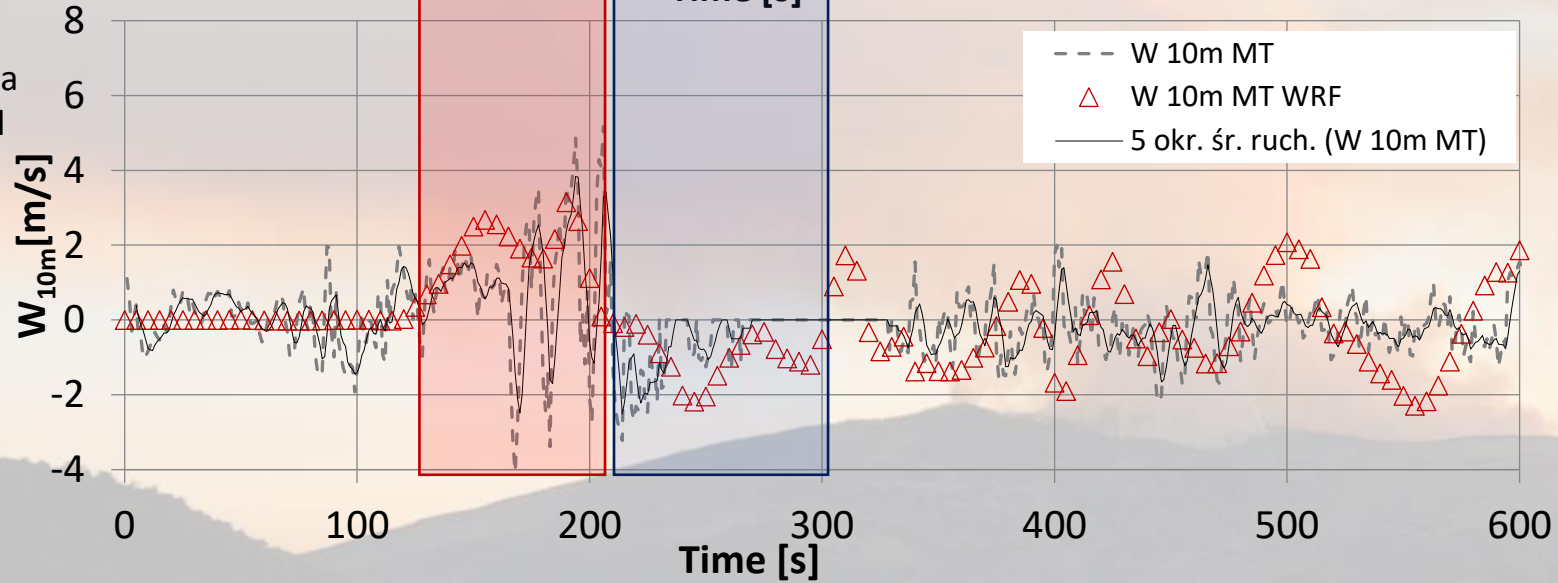
Obserwacje prądu wstępującego i zstępującego wygenerowanego przez front pożarowy

Wiatr wertykalny na wysokości 2m nad powierzchnią (Wieża główna)



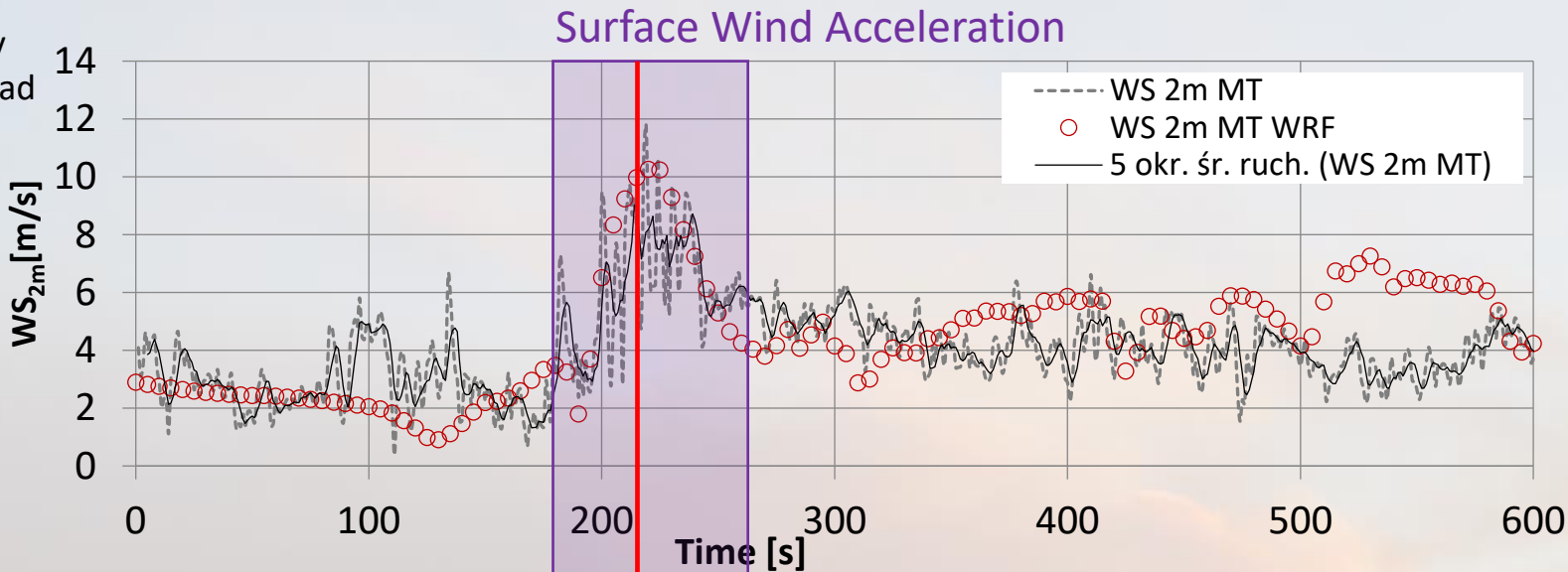
Symulacja
Obserwacja

Wiatr wertykalny na wysokości 10m nad powierzchnią (Wieża główna)

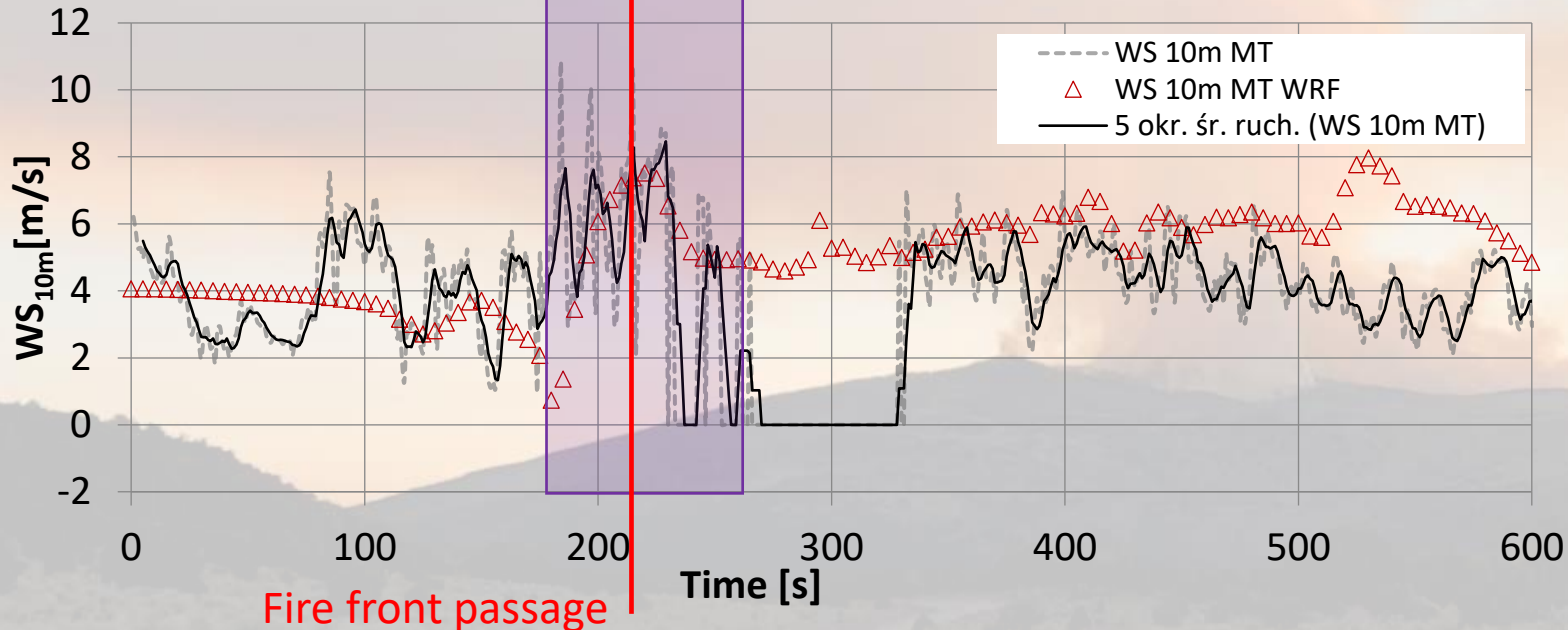


Ogień zwiększa wiatr powierzchniowy, przyspieszając jego propagację

Wiatr horizontalny na wysokości 2m nad powierzchnią (Wieża główna)



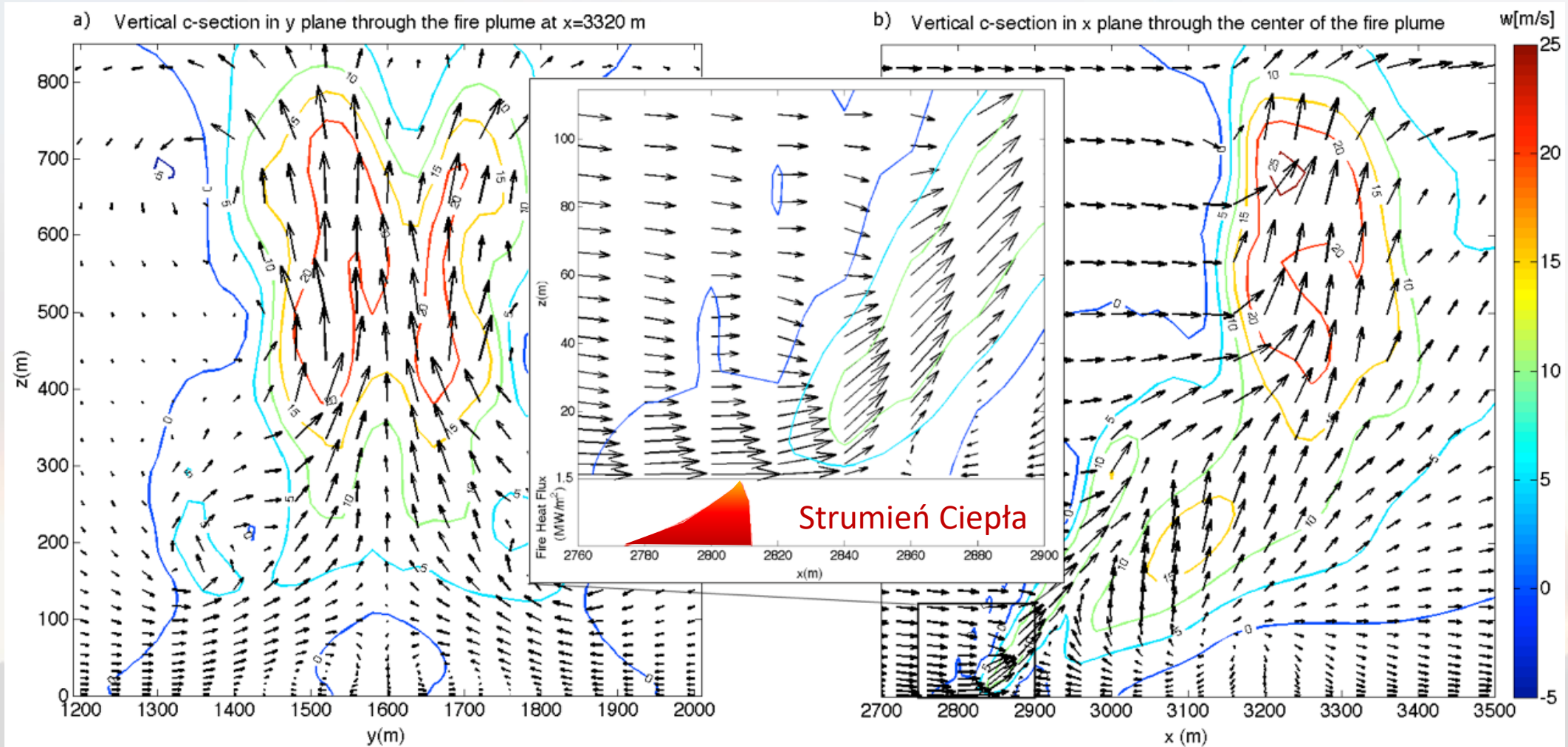
Wiatr horizontalny na wysokości 10m nad powierzchnią (Wieża główna)



Podczas przejścia frontu pożarowego wiatry na wysokości 2 metrach stają się większe niż na 10 metrach.

Podczas gdy wiatr otoczenia wieje z prędkością 3 m/s (11 km/h), przyspiesza on do 12 m/s (40 km/h) przy czole pożaru.

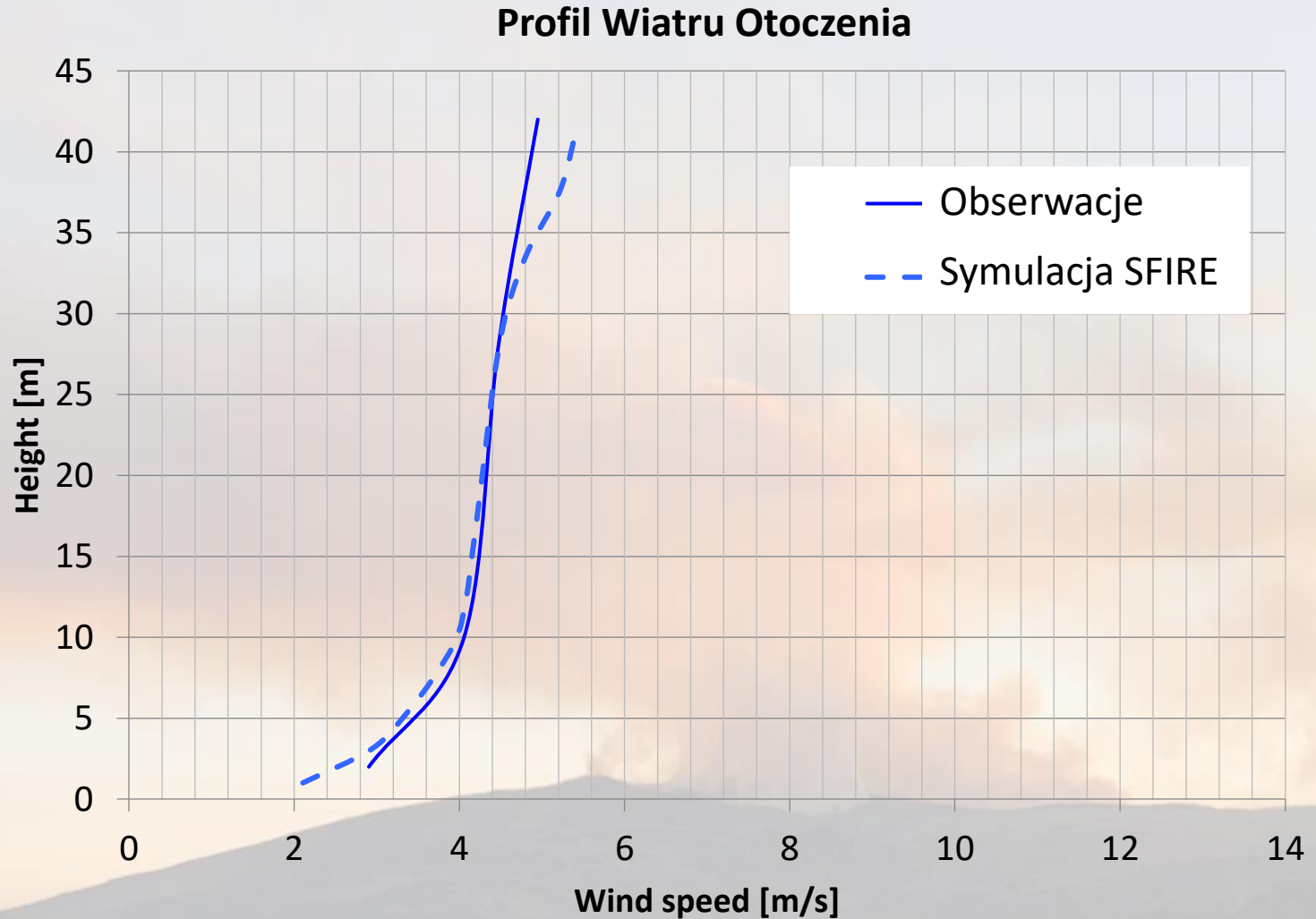
Struktura pionowa przepływu wywołanego przez pożar





Ogień odwraca typowy logarytmiczny profil wiatru, przyspieszając wiatry powierzchniowe

Profil wiatru otoczenia przed przejściem frontu pożarowego

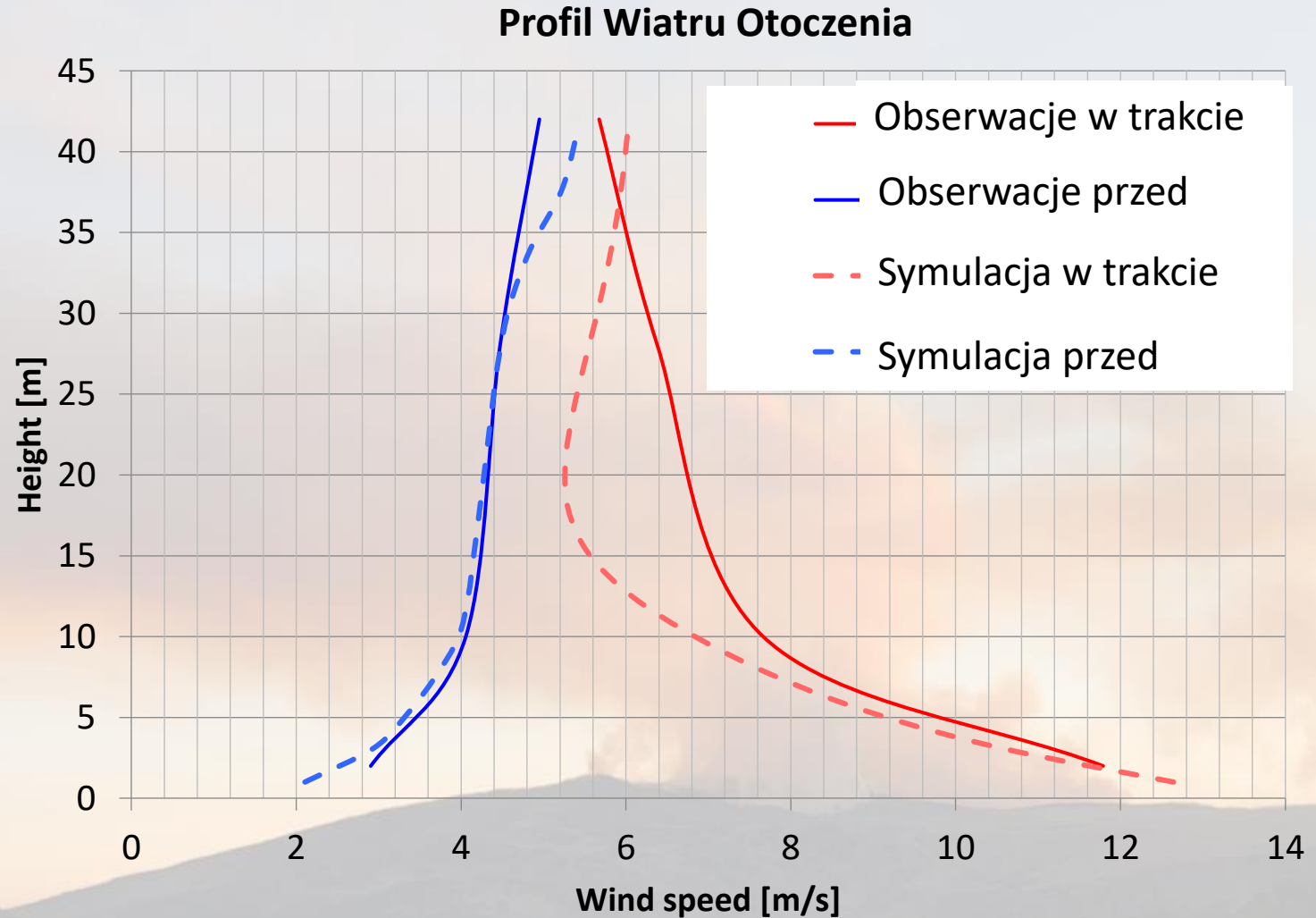




Ogień odwraca typowy logarytmiczny profil wiatru, przyspieszając wiatry powierzchniowe

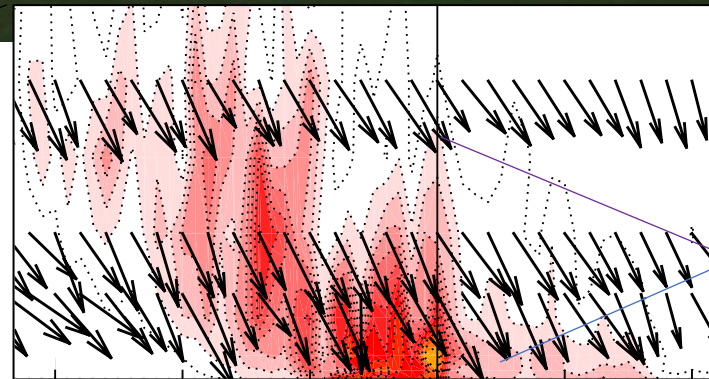
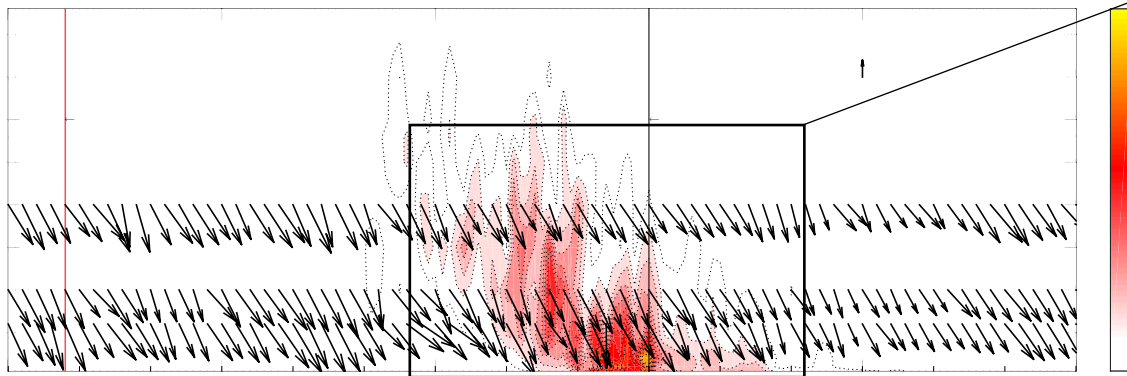
Profil wiatru otoczenia przed przejściem frontu pożaru

Profil wiatru podczas przejścia frontu pożarowego



Cyrkulacja pożarowa w trakcie silniejszego wiatru (20 km/h)

Experimentalne wypalanie FireFlux II



Wiatry w **górze** są słabsze niż na **powierzchni** podczas przejścia frontu pożarowego

Pożar modyfikuje lokalne wiatry nawet w warunkach silnego wiatru

Rozprzestrzenianie pożaru bez efektu cieplnego



Rozprzestrzenianie pożaru z efektem cieplnym



- Jednolite wiatry nie są zakłócanie przez pożar
- Wolniejsze rozprzestrzenianie się ognia

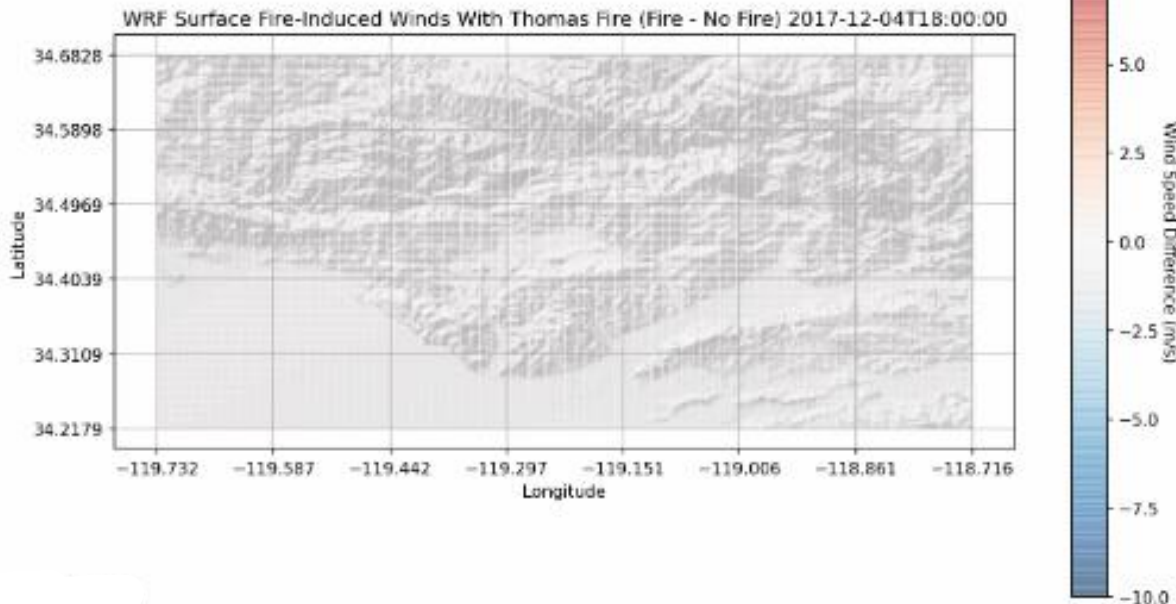
- Bardzo zmienne i silniejsze wiatry lokalne
- Szybsze rozprzestrzenianie się ognia

Interakcje ogień-atmosfera zmieniają lokalne wiatry i zachowanie pożaru

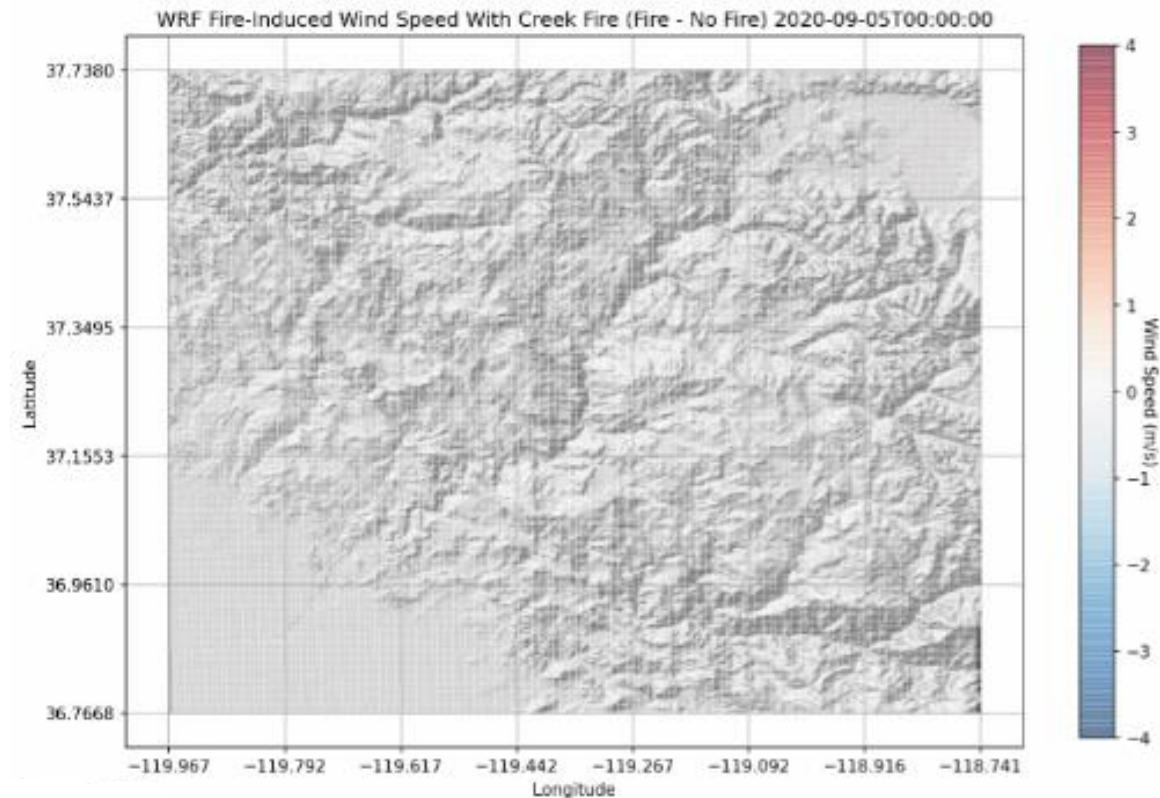
Modyfikacja wiatru w trakcie dużych pożarów

- Czerwone obszary oznaczają wiatry przyspieszone przez pożar
- Niebieskie obszary oznaczają wiatry spowolnione przez pożar
- Na potrzeby tej analizy przeanalizowano wiatry na wysokości 10 m

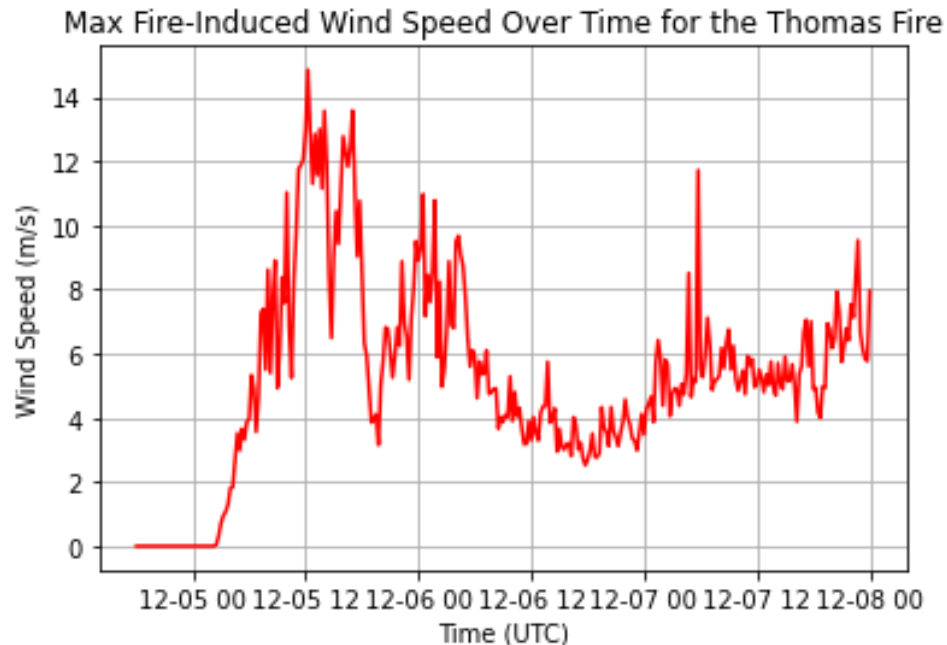
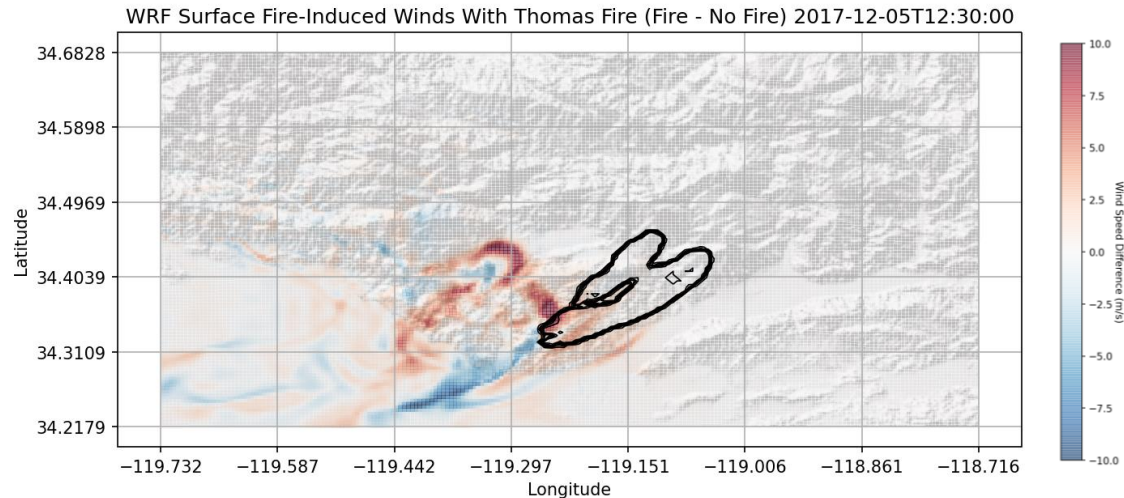
Thomas Fire (Pożar zdominowany przez wiatr)



Creek Fire (Pożar zdominowany przez słup dymu)



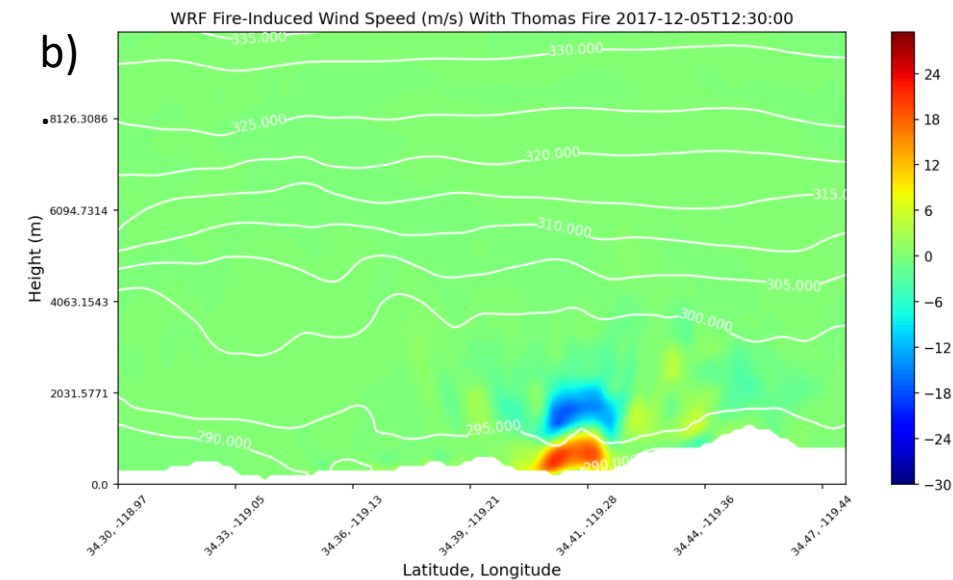
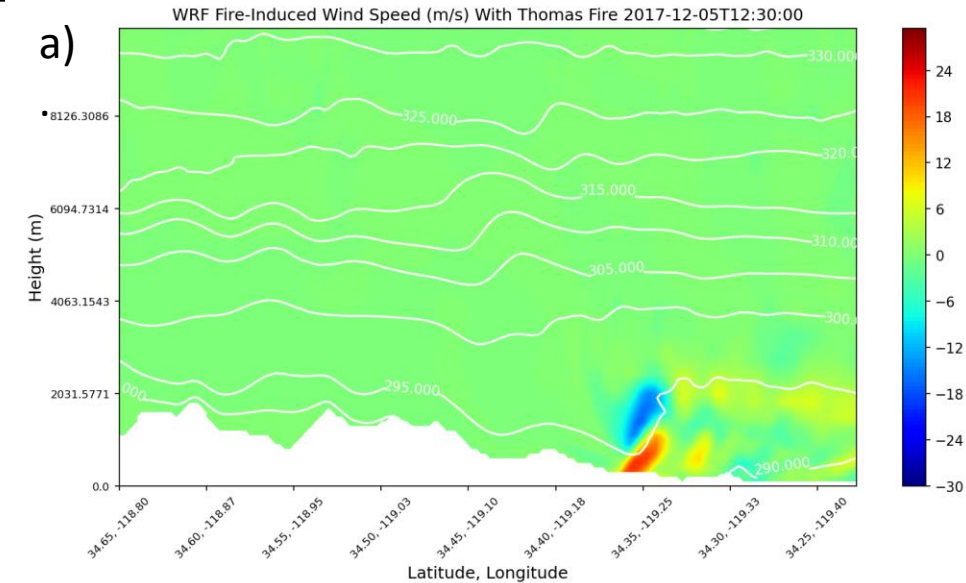
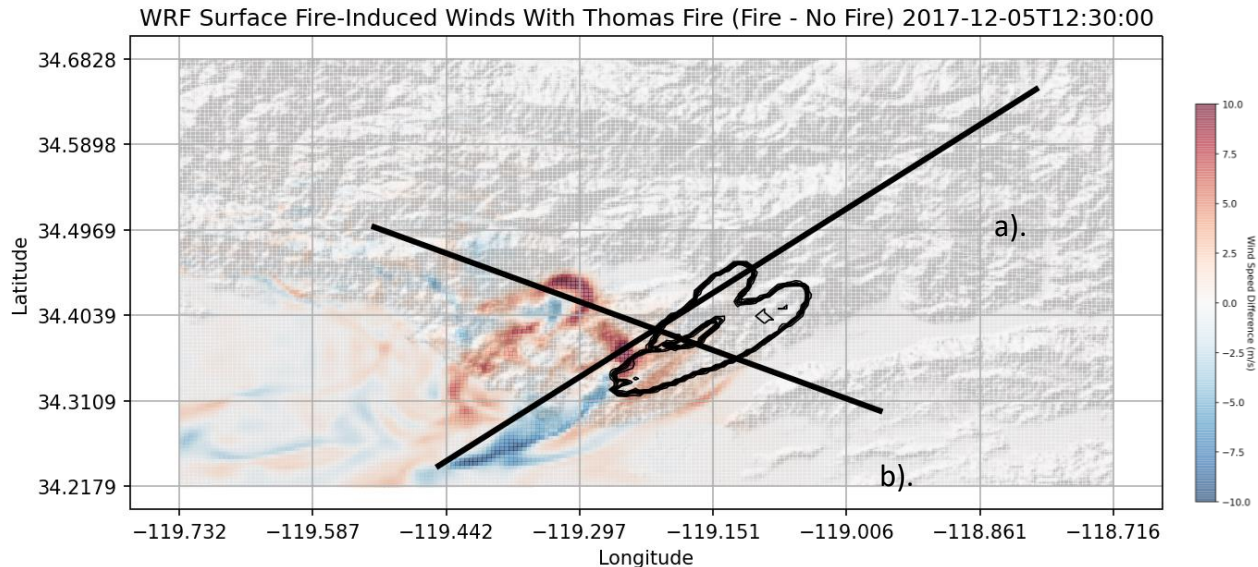
Modyfikacja wiatru w trakcie dużych pożarów – Thomas Fire



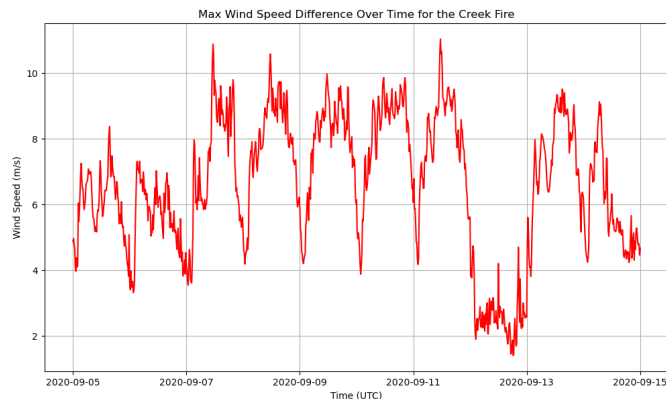
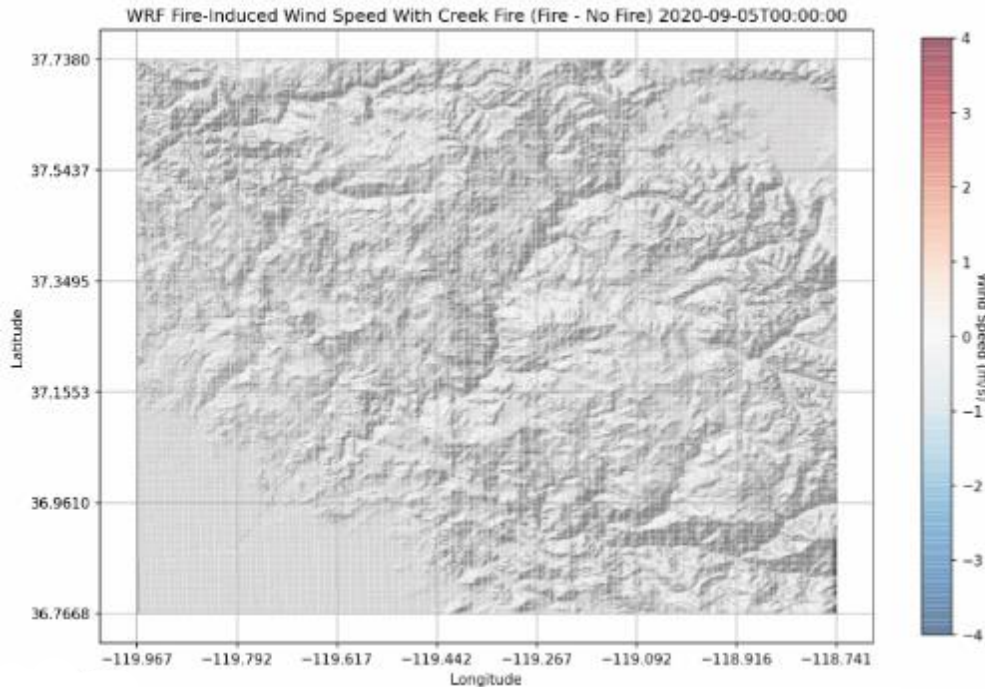
- Obszary silniejszych wiatrów wywołanych pożarem pochodzą bezpośrednio z frontu pożaru
- Najsilniejsze wiatry wywołane przez pożar (15 m/s) występują podczas początkowej ekspansji w kierunku oceanu
- Silniejsze wiatry są otoczone obszarami słabszych wiatrów, potencjalnie pokazując strefy napływu wokół ognia
- Ogień nie rozprzestrzenia się tak bardzo w obszarach niebieskich, podczas gdy pobliskie czerwone obszary pokazują bardzo szybki ROS
- Brak zauważalnego dziennego trendu wiatrów wywołanych pożarem
- Brak dziennego trendu w aktywności ognia, ponieważ jest ciepło i sucho przez cały dzień i noc

Modyfikacja wiatru w trakcie dużych pożarów – Thomas Fire

- Większe różnice w prędkości wiatru mają miejsce w momencie, gdy pożar przechodzi przez przekrój pionowy
- Aktywność fal górskich jest bardzo widoczna nad wyższymi górami
- Silnym wiatrom wywołanym ogniem na powierzchni towarzyszą znacznie zredukowane wiatry zlokalizowane powyżej
- Granice między tymi dwoma regionami powodują zakłócenia w układzie fal górskich

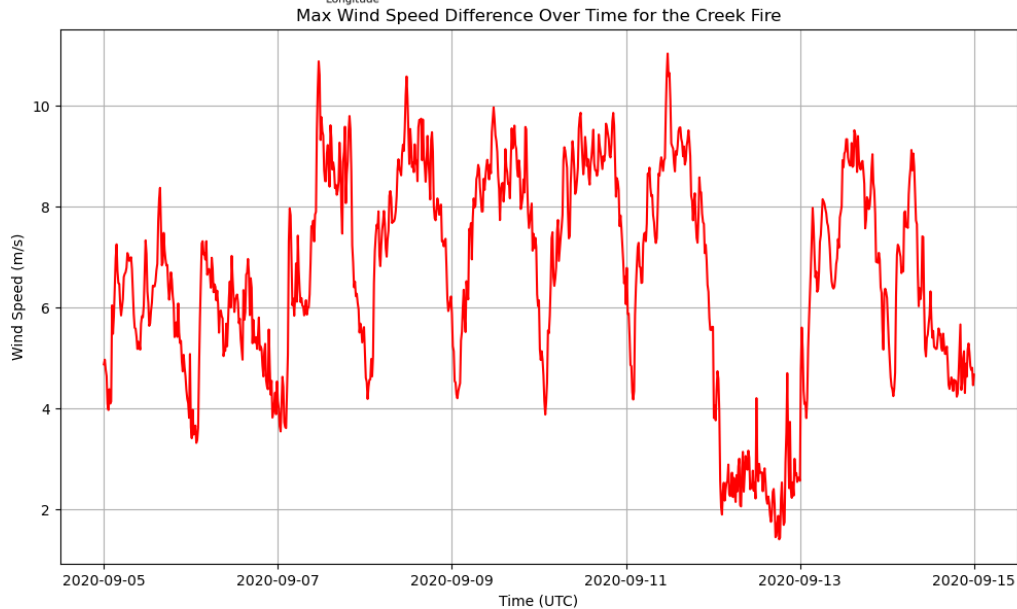
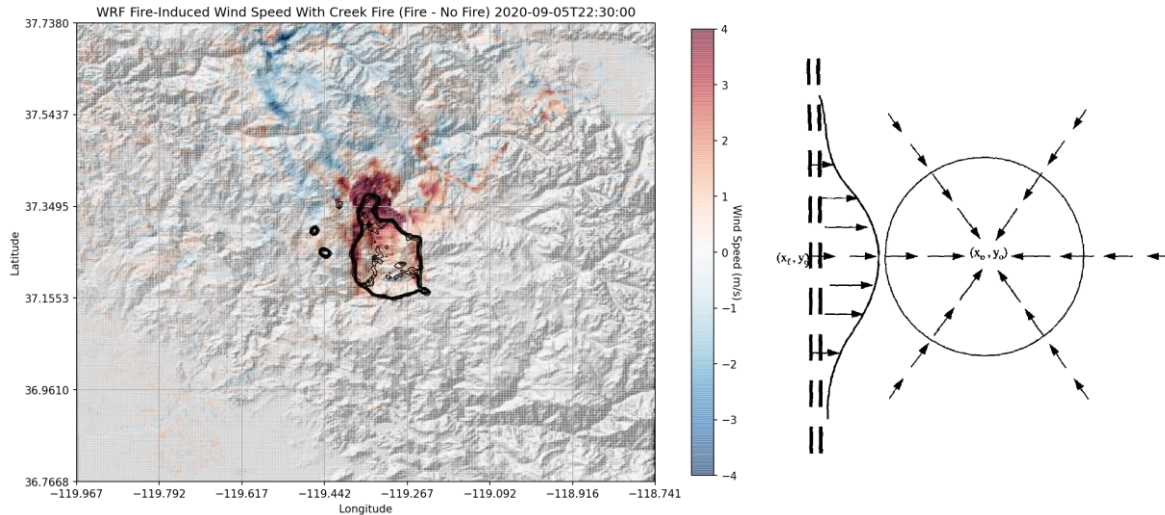


Modyfikacja wiatru w trakcie dużych pożarów – Creek Fire



- Początkowo dominowany przez wiatr, po kilku dniach Creek Fire szybko zmienił charakter i pozostał pod dominacją pyrokonwekcyjnej cyrkulacji
- Impuls wiatrów wywołanych pożarem jest połączony z ekspansją pożaru
- Widoczny jest wyraźny cykl dobowy

Modyfikacja wiatru w trakcie dużych pożarów – Creek Fire

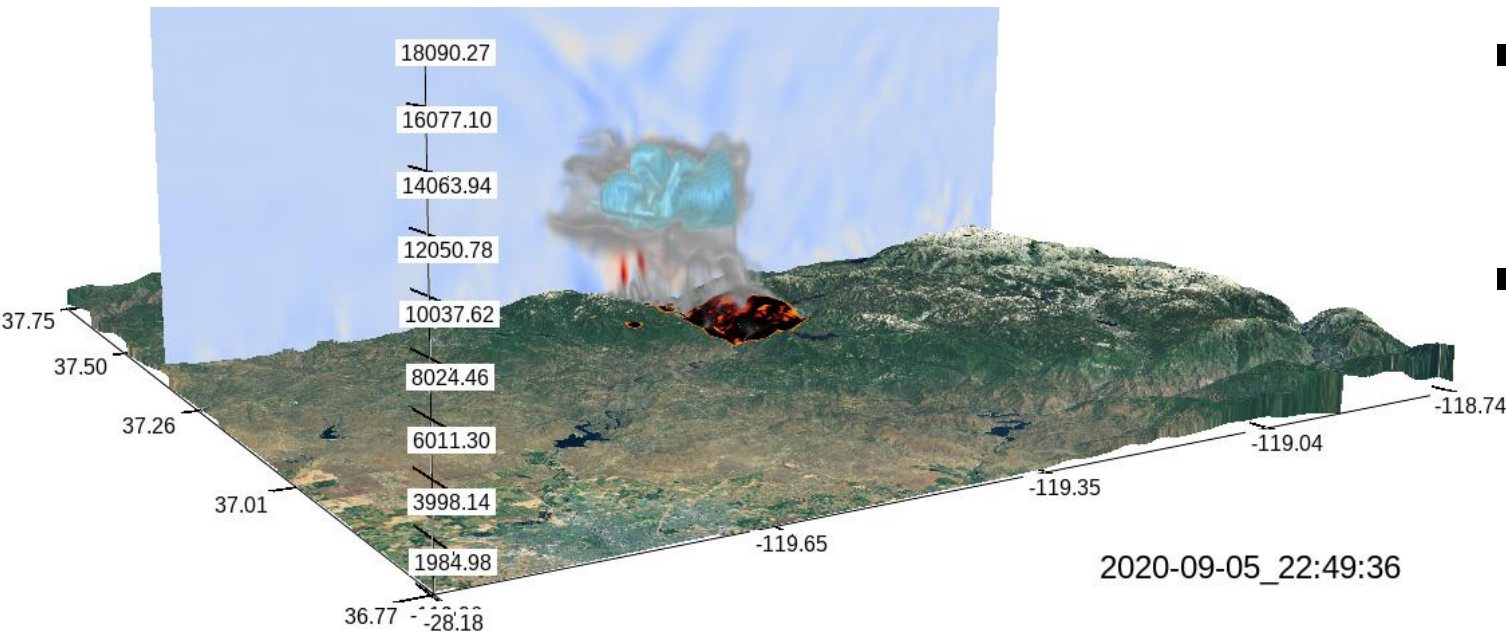


- Początkowo dominowany przez wiatr po kilku dniach, Creek Fire szybko zmienił charakter i pozostał pod dominacją pyrokonwekcyjnej cyrkulacji
- Impuls wiatrów wywołanych pożarem jest połączony z ekspansją pożaru
- Widoczny jest wyraźny cykl dobowy



Modyfikacja zachmurzenia w trakcie dużych pożarów – Creek Fire

Cloud Water Mixing Ratio (kg/kg)

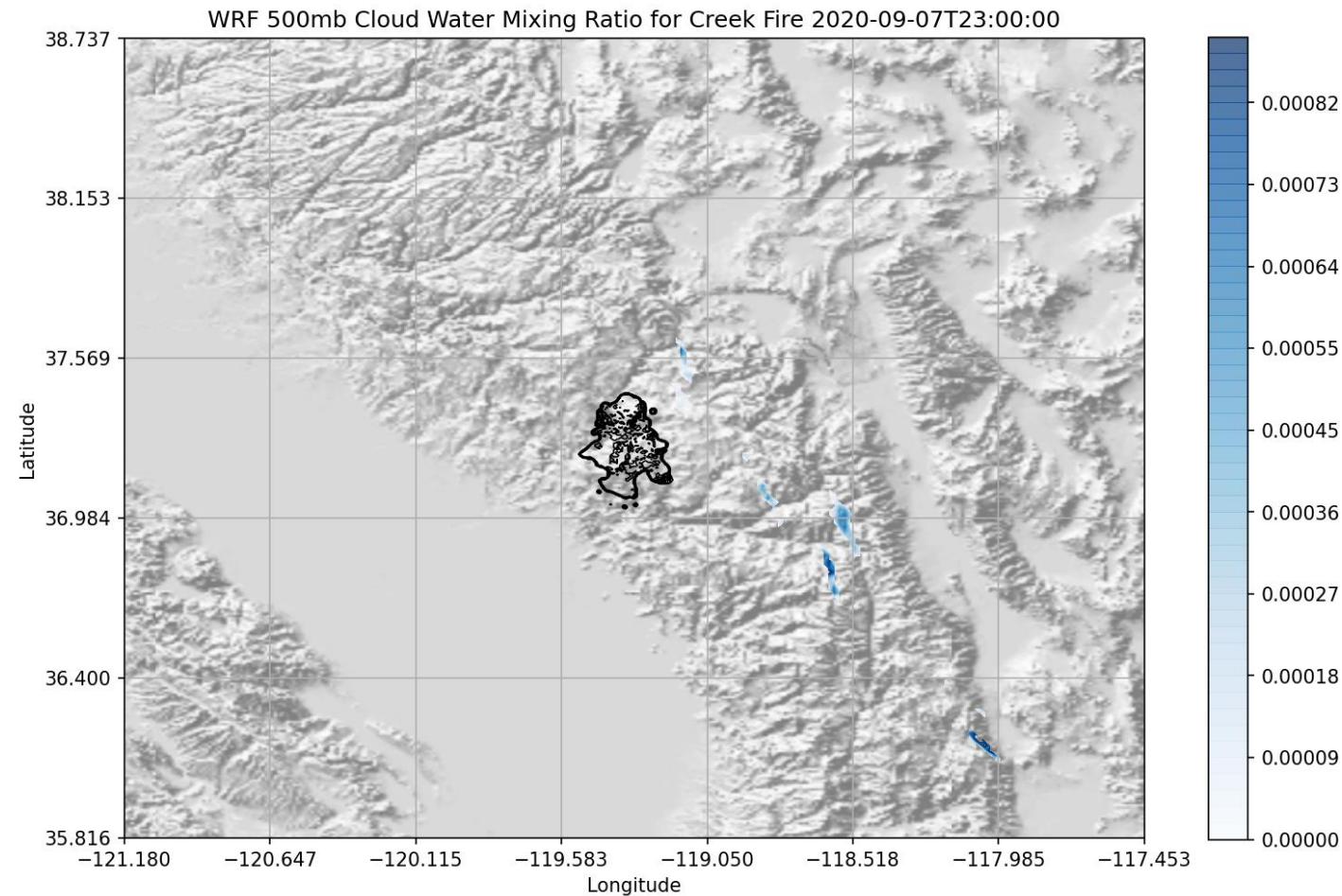


- Szary kolor reprezentuje dym
- Niebieski reprezentuje chmurę wygenerowaną przez pożar
- Przekrój pokazuje silne konwekcyjne rdzenie (zaznaczone na czerwone) wygenerowane przez pożar
- Brązowy kształt na powierzchni reprezentuje pożar



Modyfikacja zachmurzenia w trakcie dużych pożarów – Creek Fire

Cloud Water Mixing Ratio (kg/kg)

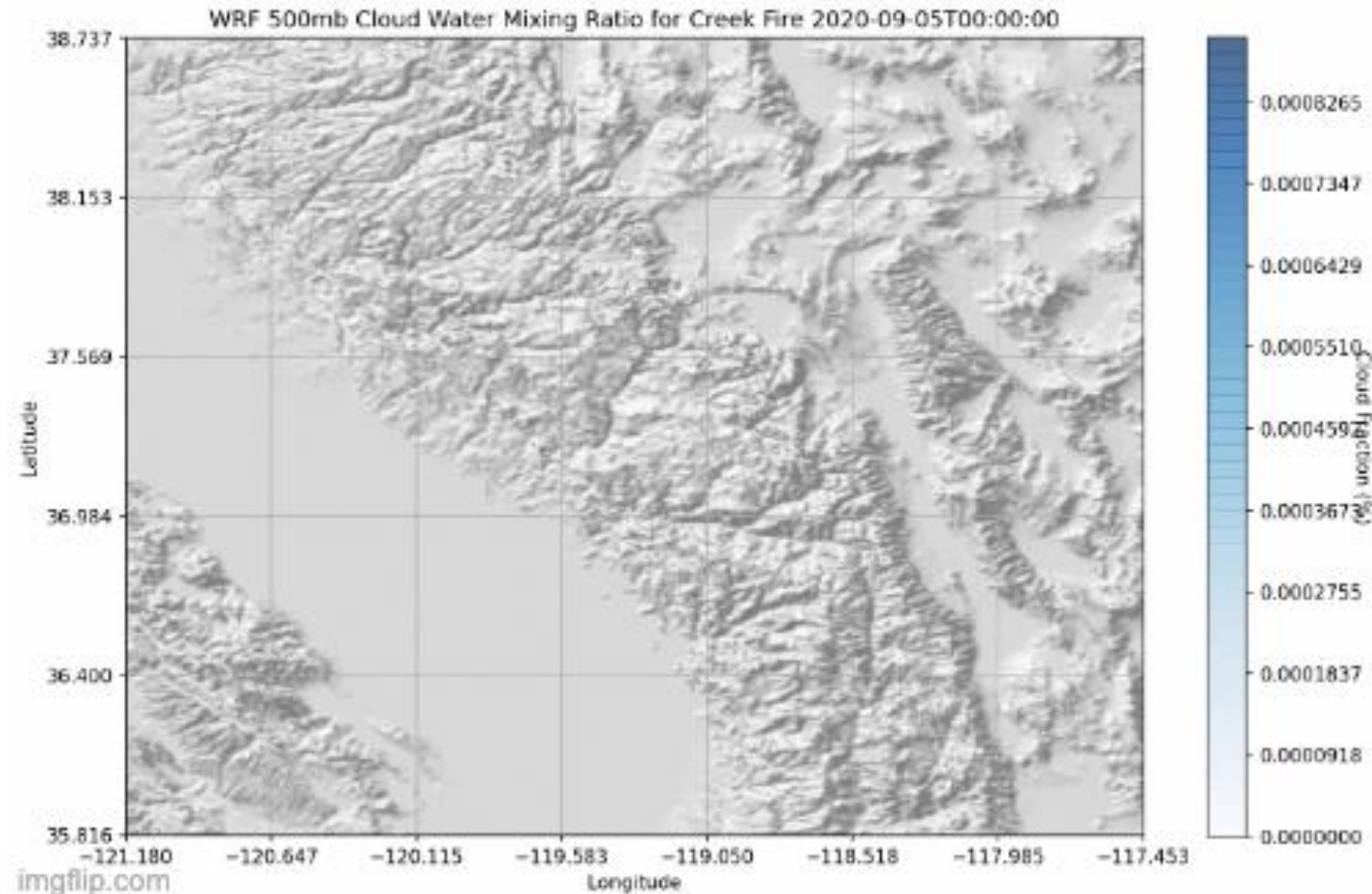


- Symulowana zawartość kondensatu wskazuje na tworzenie się chmur podczas pożaru
- Niebieskie kolory wskazują na rejony o podwyższonej ilości chmur w wyniku konwekcji zainicjowanej przez pożar i dodatkowego strumienia pary wodnej jako produktu spalania
- Ponieważ obecność chmur nie musi automatycznie oznaczać opadów, przeanalizowano również symulowane opady, aby ocenić **wpływ pożaru na ilość opadów**



Modyfikacja zachmurzenia w trakcie dużych pożarów – Creek Fire

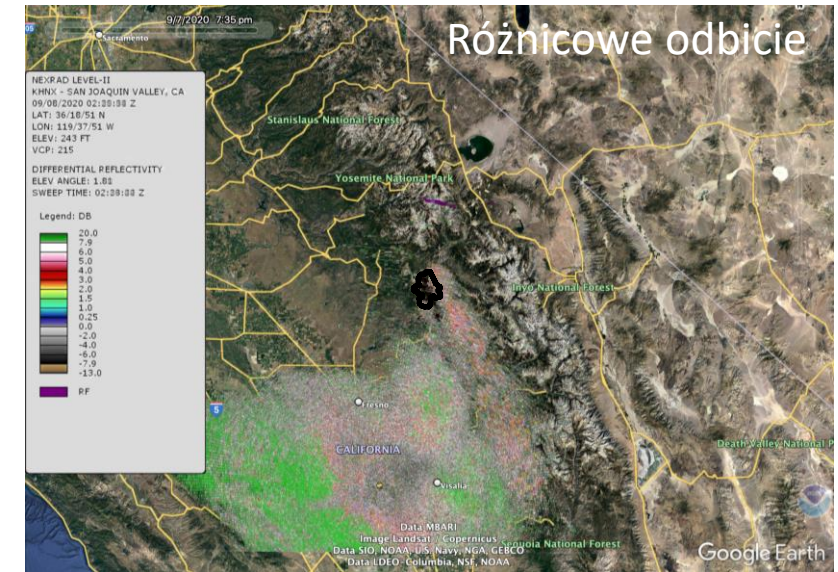
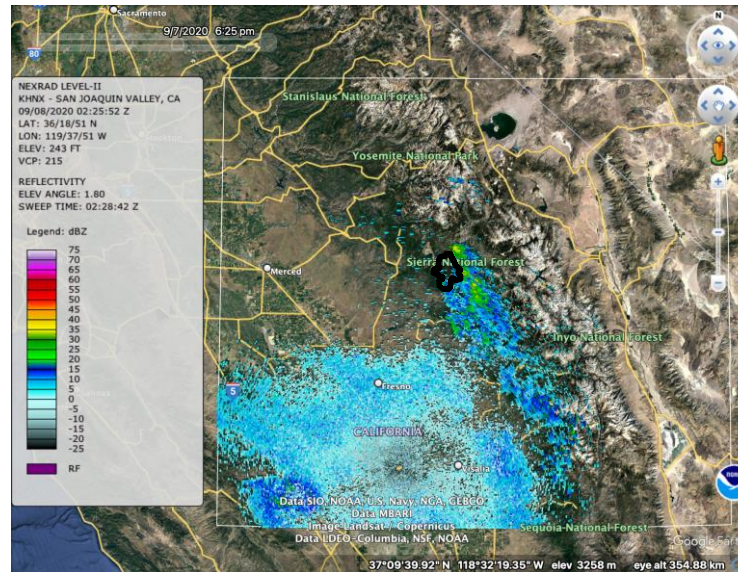
Cloud Water Mixing Ratio (kg/kg)



- Symulowana zawartość kondensatu wskazuje na tworzenie się chmur podczas pożaru
- Niebieskie kolory wskazują na rejony o podwyższonej ilości chmur w wyniku konwekcji zainicjowanej przez pożar i dodatkowego strumienia pary wodnej jako produktu spalania
- Ponieważ obecność chmur nie musi automatycznie oznaczać opadów, przeanalizowano również symulowane opady, aby ocenić **wpływ pożaru na ilość opadów**

Modyfikacja zachmurzenia w trakcie dużych pożarów – Creek Fire

- Współczynnik odbicia wykorzystano do wykrycia, które obszary miały potencjalne opady
- Różnicowe odbicie wykorzystano do określenia, które cząstki mogą mieć kształt kropli deszczu
- Wartości od 1-3 dB są reprezentatywne dla deszczu
- Współczynnik korelacji i odbicia różnicowego został użyty aby potwierdzić obecność nie tylko dymu ale i opadów
- Wartości współczynnika korelacji zbliżone do 1 i małego odbicia różnicowego oznaczają deszcz. Małe współczynniki korelacji i duże wartości odbicia różnicowego oznaczają dym

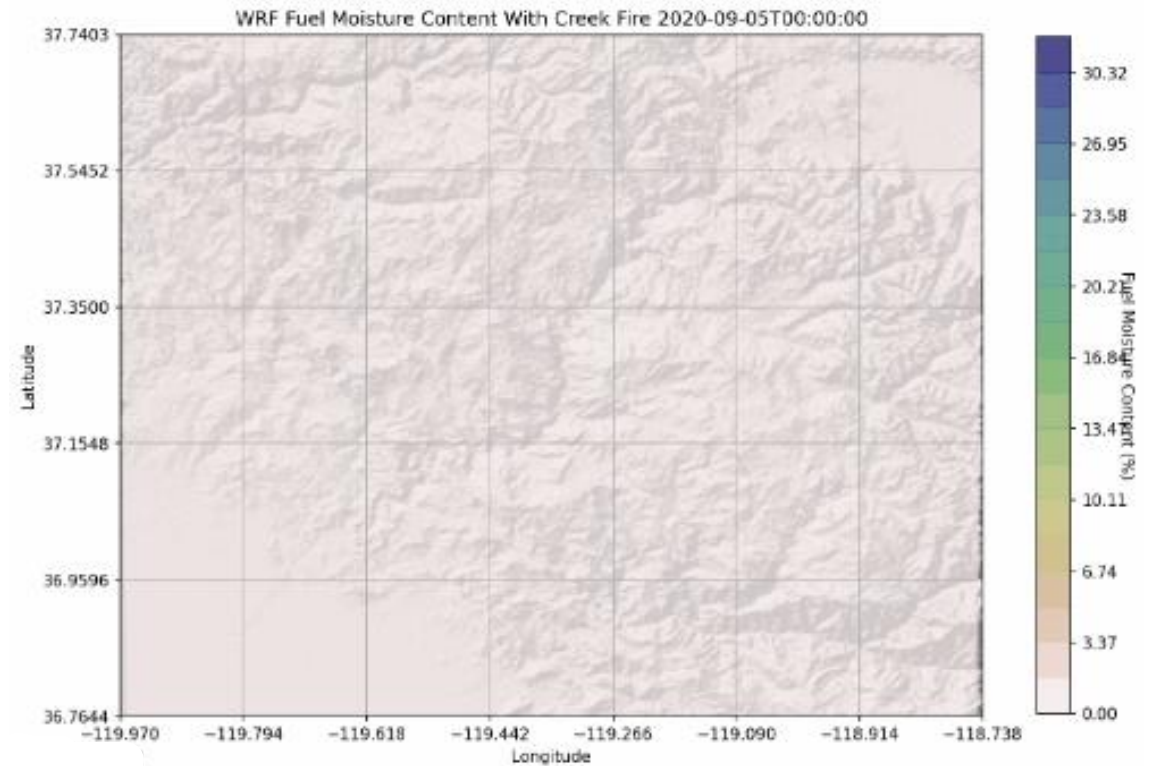
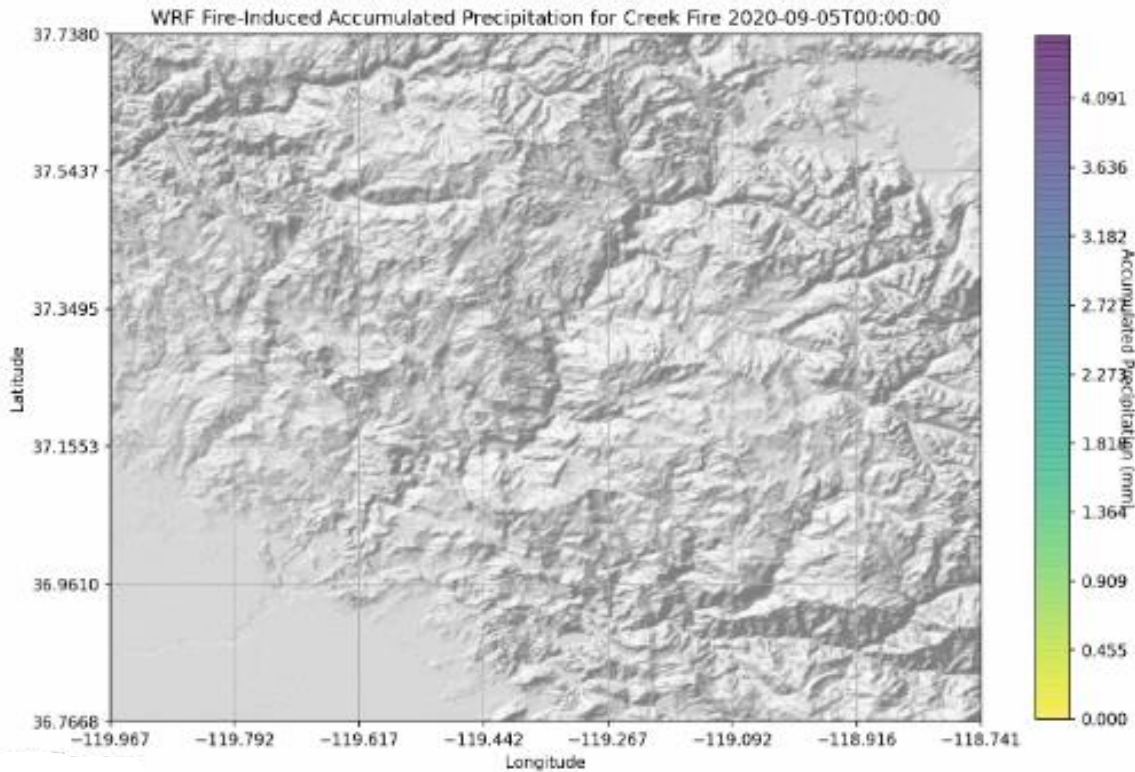




Akumulacja opadów wywołanych przez pożar– Creek Fire

Opady atmosferyczne wywołane pożarem

Wilgotność paliwa



9/11

Fire ROS	0.1725
No Fire ROS	0.195
Percent Difference	13.04%

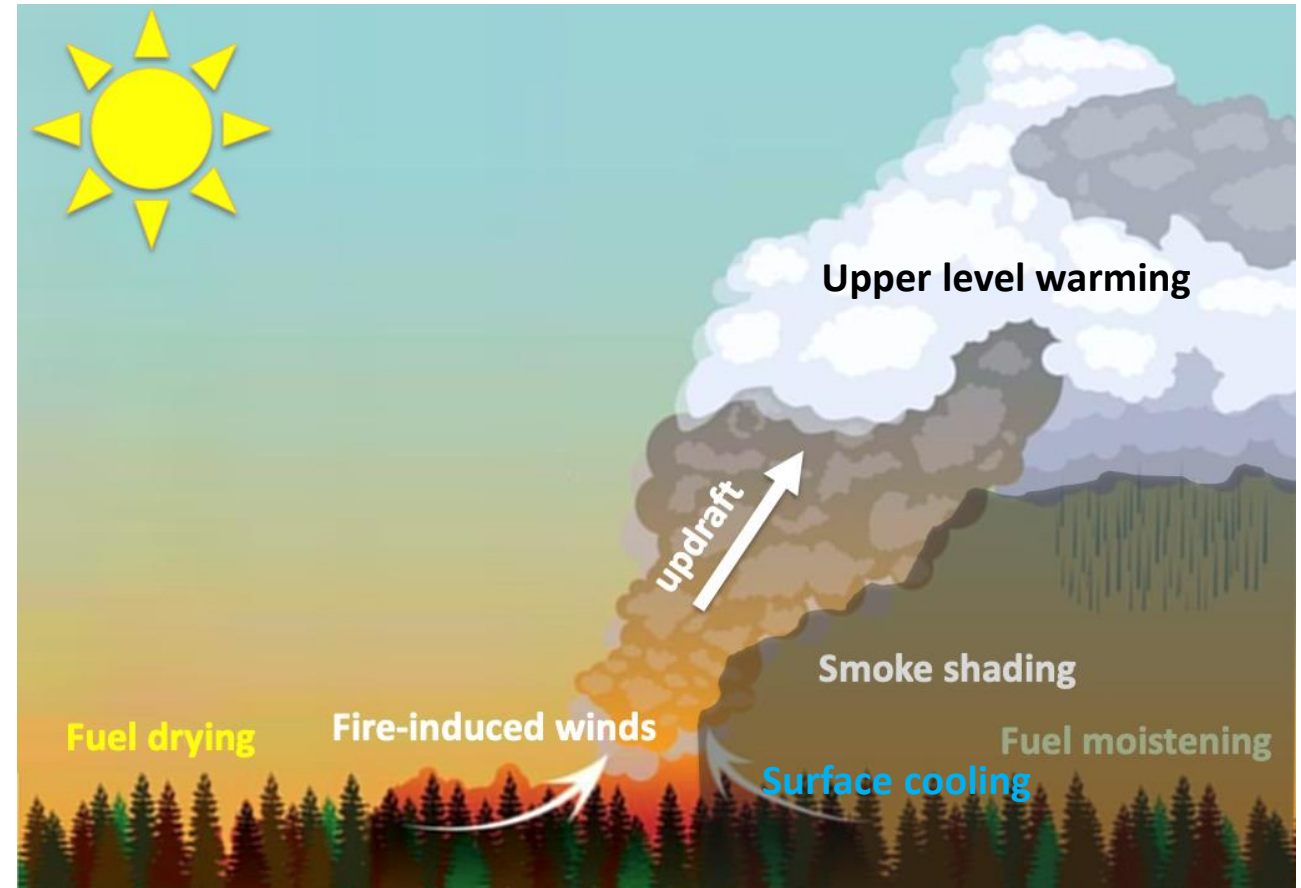
9/12

Fire ROS	0.2476
No Fire ROS	0.2661
Percent Difference	7.47%

Zwiększone opady wzdłuż linii pożaru zwiększyły wilgotność paliwa na tyle, aby spowolnić ROS nawet o 13%.

Wpływ dymu z pożaru na warunki atmosferyczne

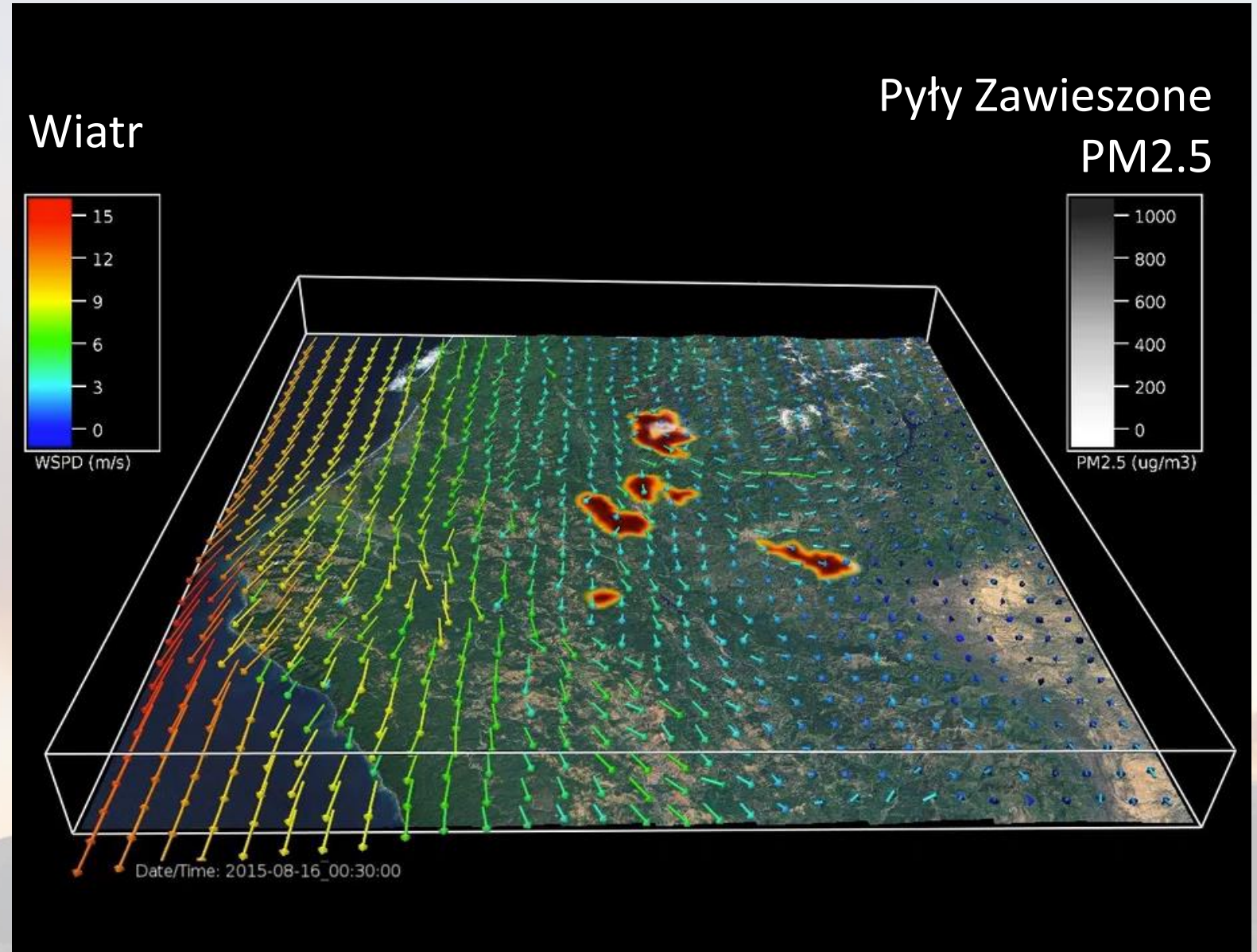
- Cząsteczki dymu pochłaniają przychodzące promieniowanie słoneczne, wpływając na bilans energetyczny powierzchni i obniżając temperaturę powierzchni (zacienienie dymu)
- Zmniejszone ogrzewanie powierzchni ogranicza mieszanie konwekcyjne i hamuje ewolucję planetarnej warstwy granicznej
- W związku z tym lokalne warunki meteorologiczne w regionach dotkniętych dymem mogą znacznie różnić się od warunków w regionach niedotkniętych dymem
- Zmiany w lokalnej meteorologii mogą wpływać na rozpraszanie dymu, a potencjalnie także na zachowanie ognia



Dym może zmieniać lokalne warunki meteorologiczne, powodując chłodzenie powierzchni, słabnące wiatry.

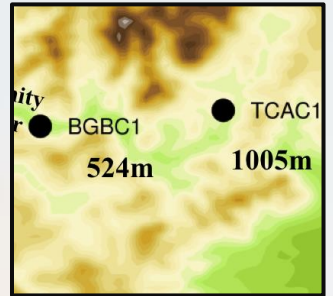
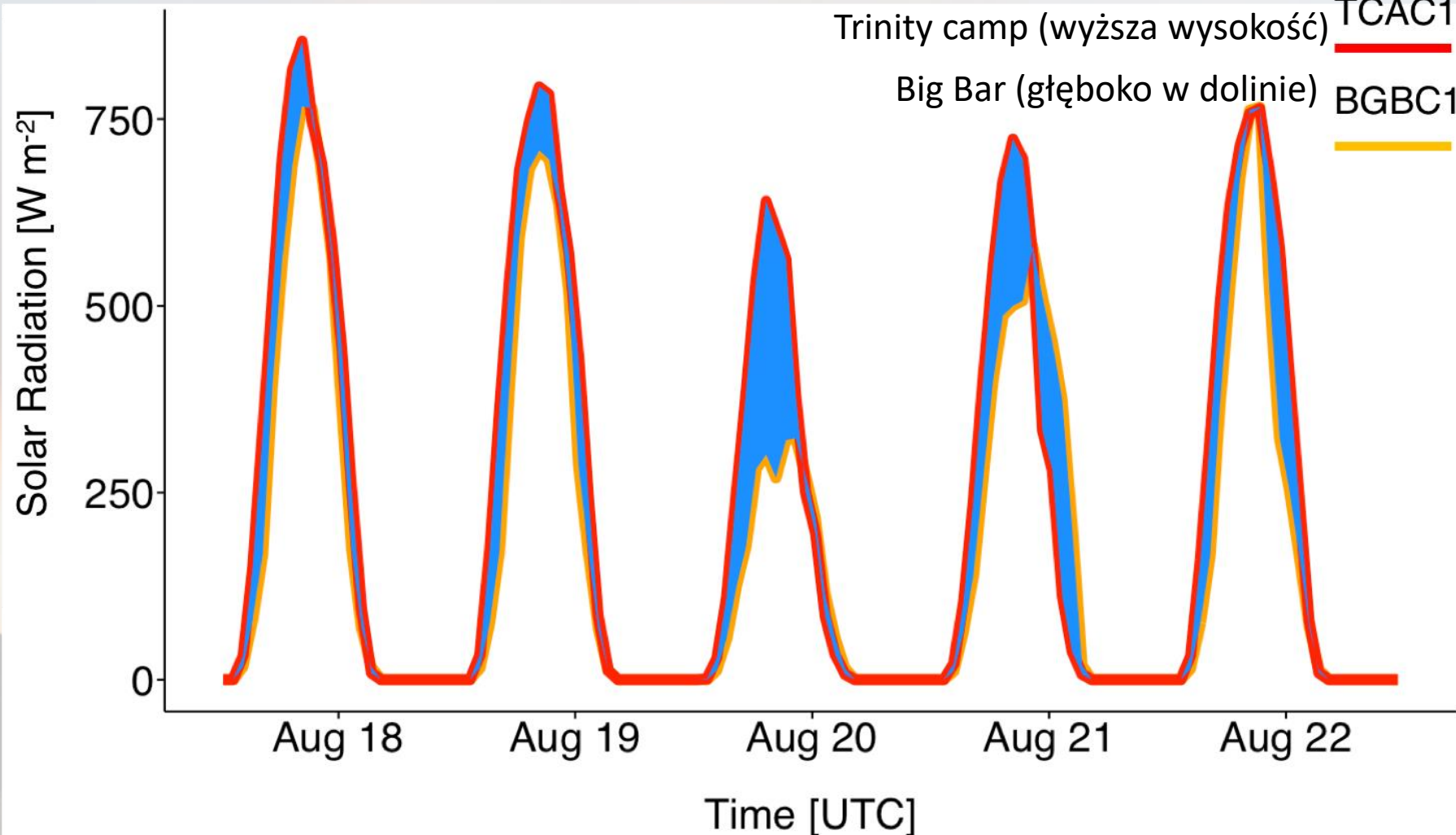
Sprężona symulacja uwzględniające radiacyjne oddziaływanie dymu

- Przeprowadzamy symulacje sprężone z WRF-SFIRE dla pożarów CA z sierpnia 2015 r.
- Symulujemy 5 pożarów w domenie 3 w rozdzielczości 1,3 km i jeden w domenie 2 w rozdzielczości 4 km
- Dym z tych pożarów oddziałuje poprzez parametryzując GOCART z promieniowaniem atmosferycznym, aby uwzględnić efekty radiacyjne dymu pożarowego.



Obserwowany wpływ dymu na promieniowanie słoneczne

Promieniowanie słoneczne obserwowane przez stacje TCAC1 i BGBC1

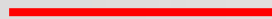




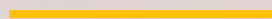
Symulacja sprzężona uwzględniające radiacyjne oddziaływanie dymu

Wpływ dymu na przychodzące promieniowanie słoneczne

Symulacja bez radiacyjnego wpływu dymu



Symulacja z radiacyjnym wpływem dymu

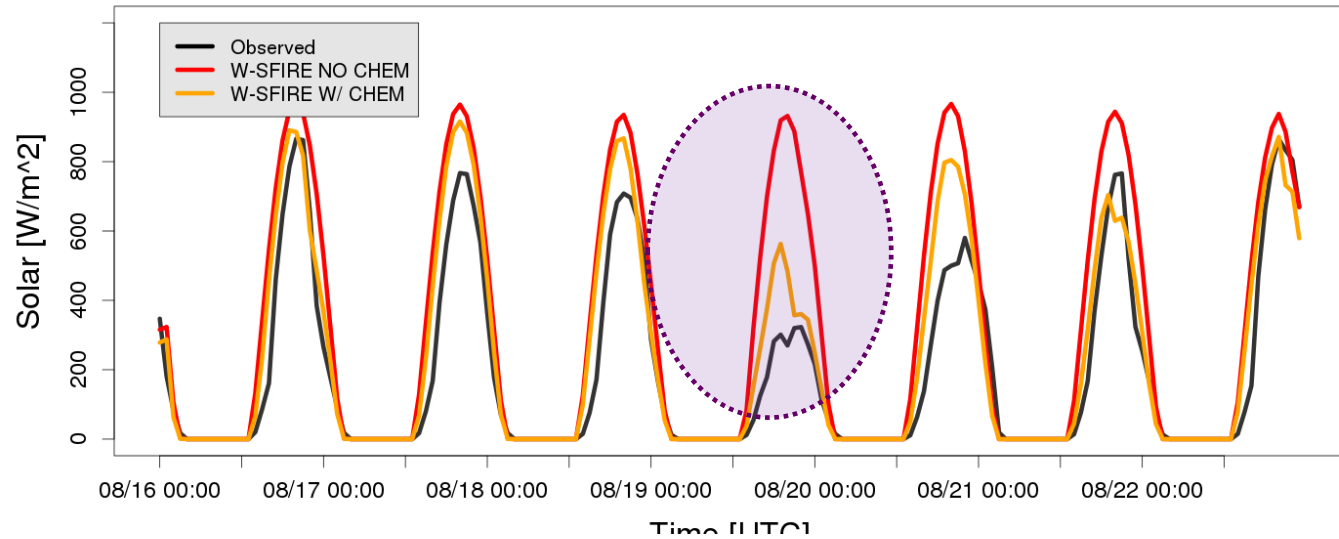


Obserwacje meteorologiczne

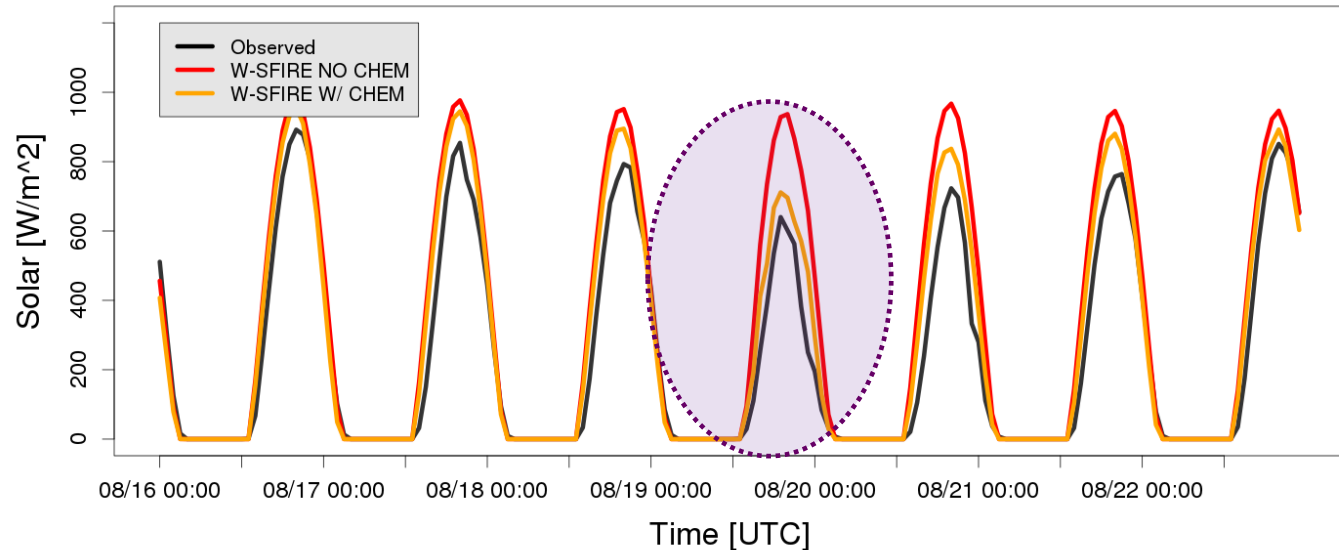


Incoming solar radiation comparison at: BGBC1

Big Bar



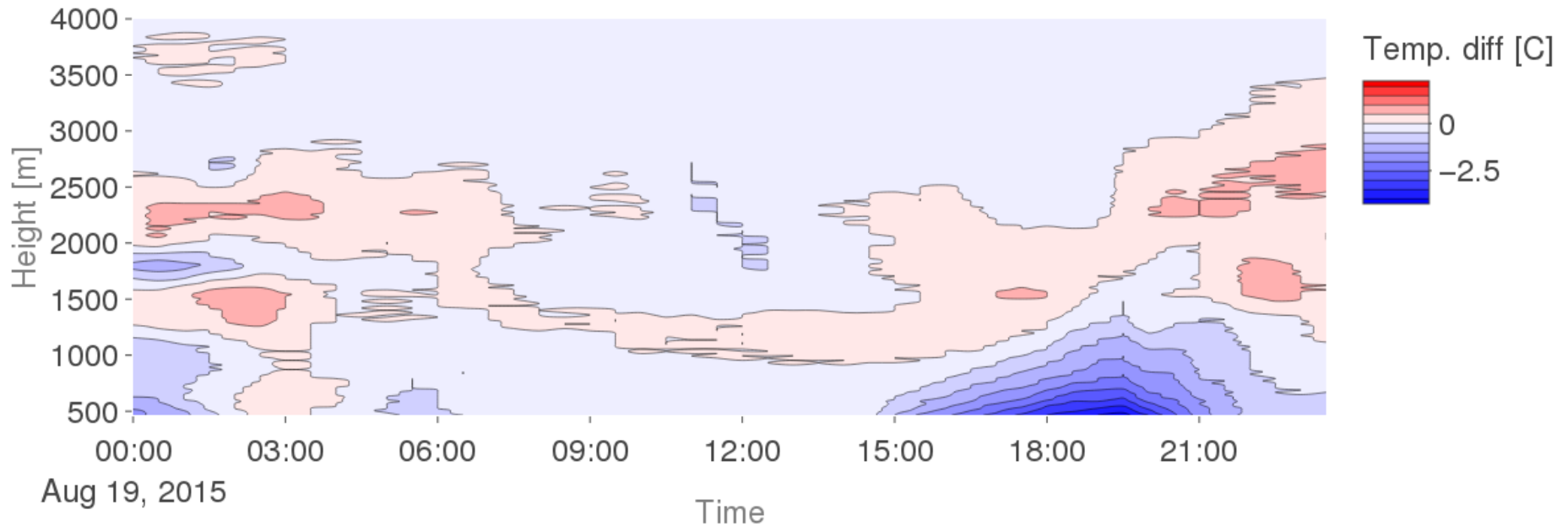
Incoming solar radiation comparison at: TCAC1 Trinity Camp



Symulacja sprzężona uwzględniające radiacyjne oddziaływanie dymu

Termiczne efekty dymu – struktura pionowa

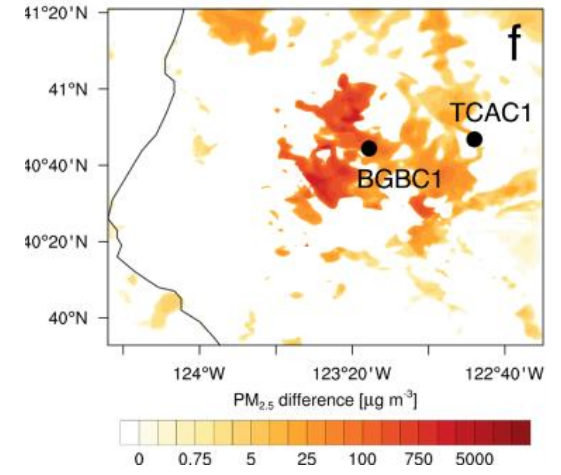
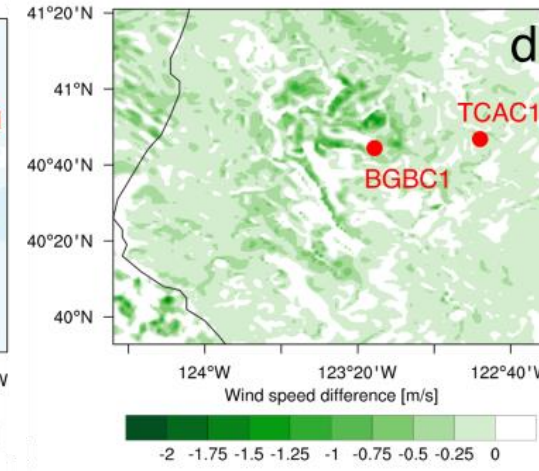
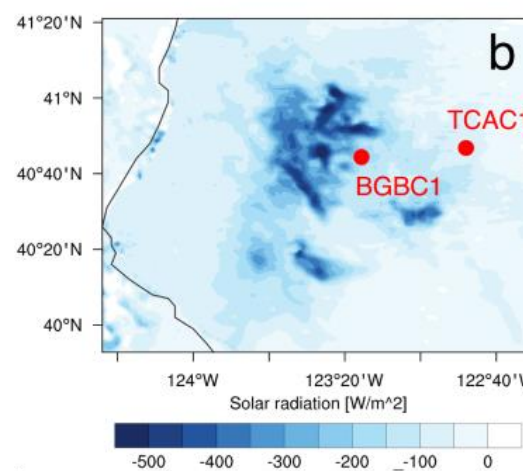
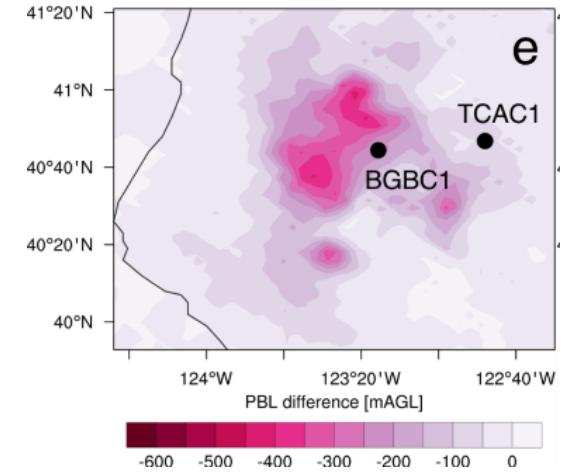
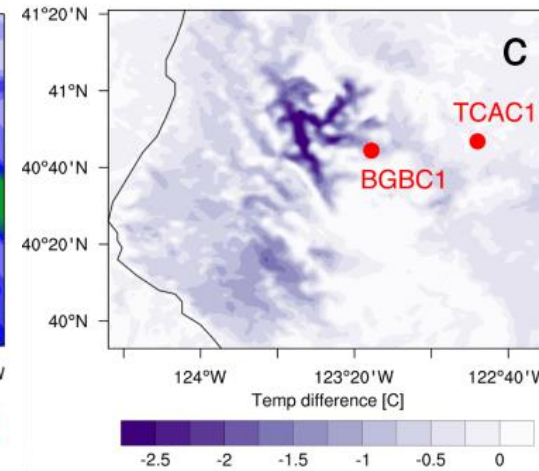
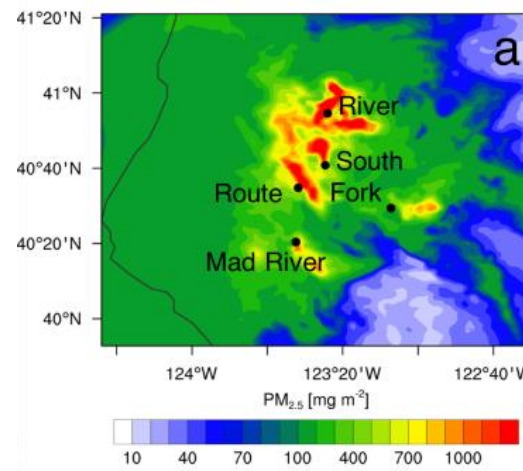
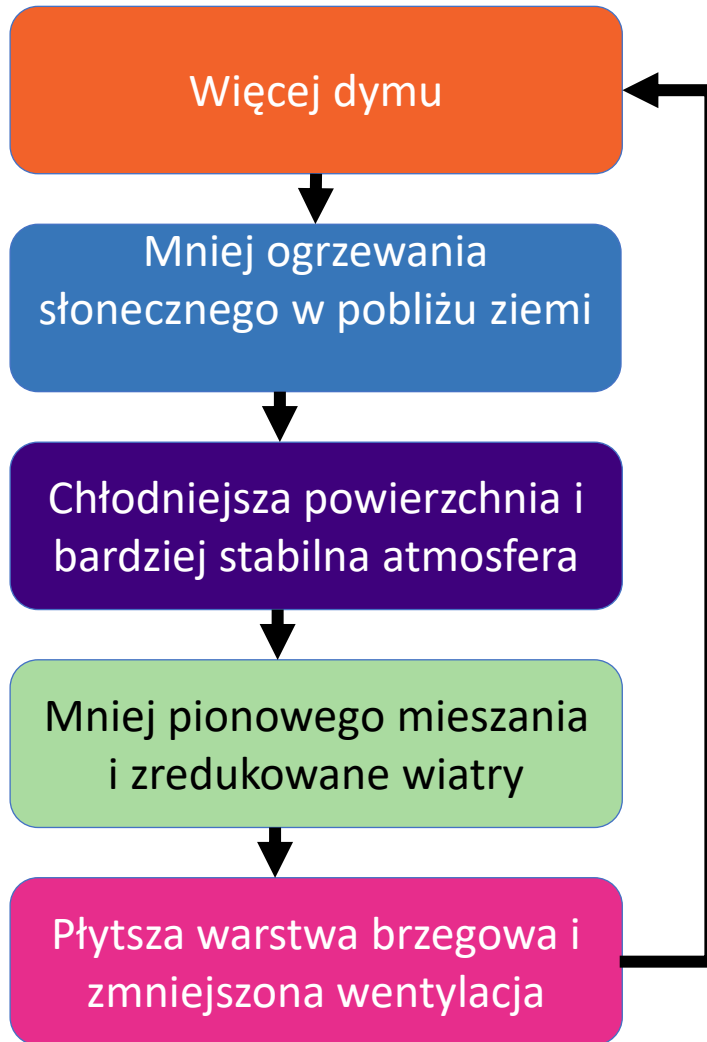
WRF w/ Fire & Chem - WRF w/ FIRE



Różnice w pionowych profilach temperatury między symulacją WRF-SFIRE z i bez efektów dymu radiacyjnego ujawniają ocieplenie w ciągu dnia na większych wysokościach i chłodzenie na powierzchni, co zwiększa stabilność atmosfery, wzmacnia lokalne inwersje i hamuje wentylację dymu uwięzionego w dolinach.

Wpływ dymu z pożarów na warunki atmosferyczne

Mechanizm pozytywnego sprzężenia zwrotnego:

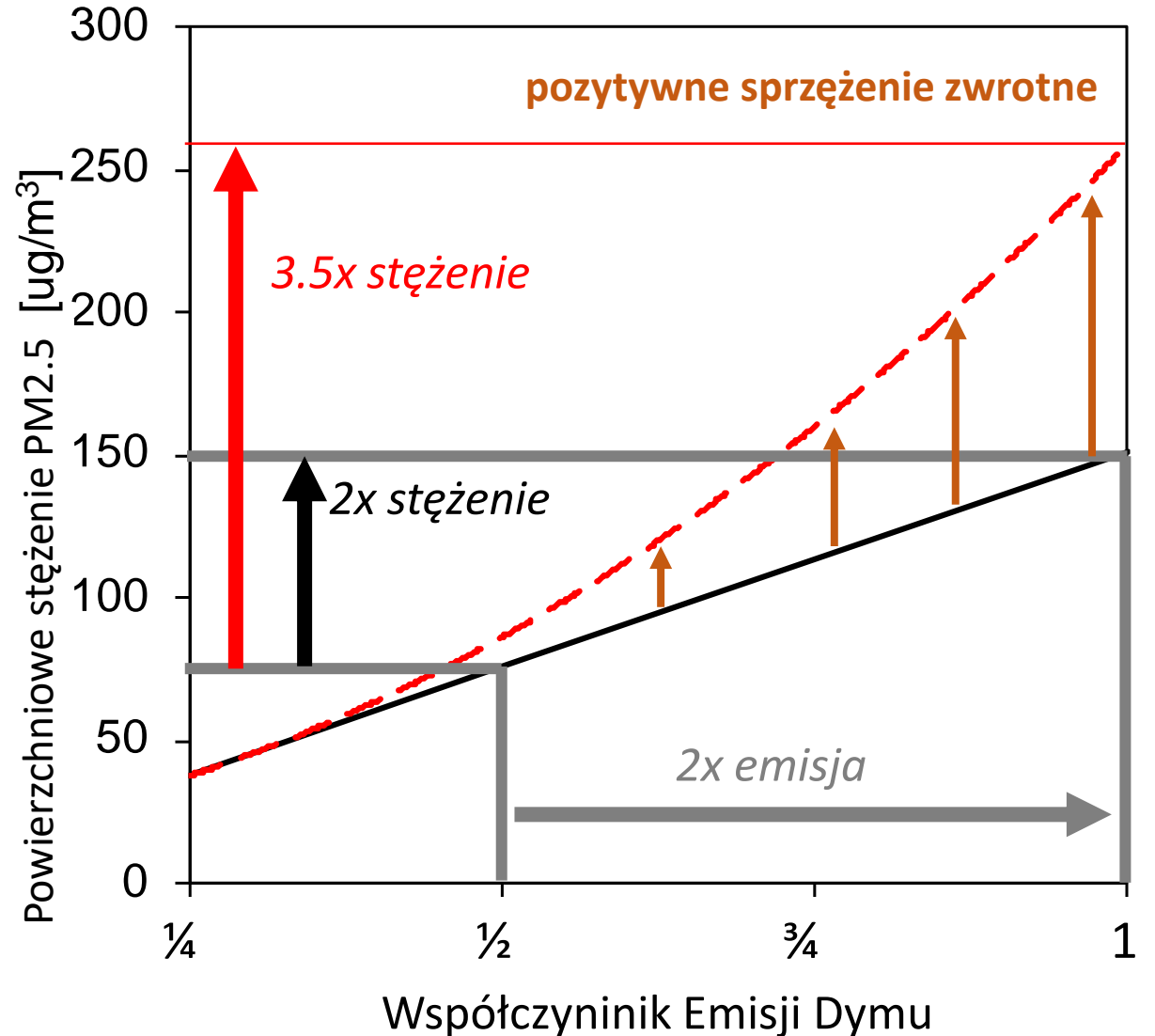


Wpływ dymu z pożarów na warunki atmosferyczne

Dodatnie sprzężenie zwrotne jest odpowiedzialne za nieliniową zależność między emisjami a stężeniami przypowierzchniowymi.

Ze względu na radiacyjny efekt dymu i chłodzenie powierzchni, głębokość warstwy granicznej i wiatry powierzchniowe są redukowane, co z kolei prowadzi do wzrostu stężenia dymu powierzchniowego i pogorszenia jakości powietrza

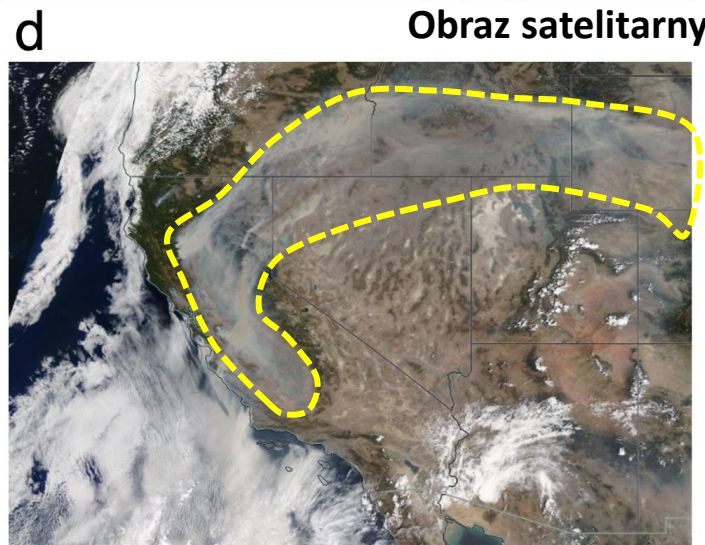
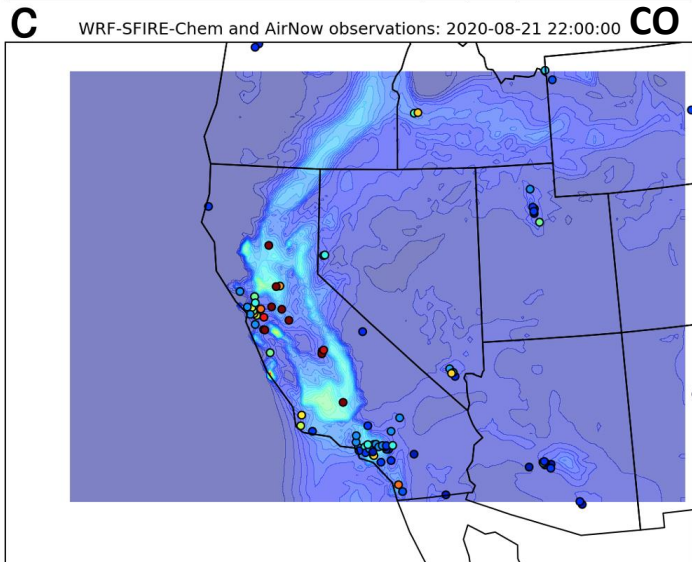
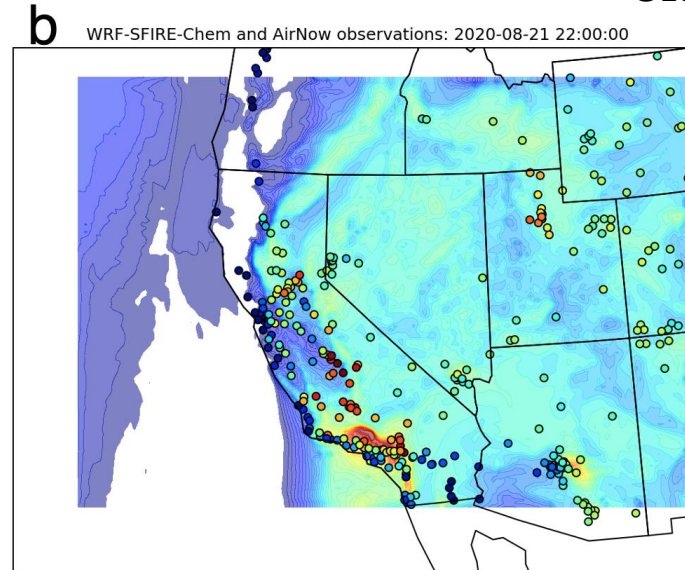
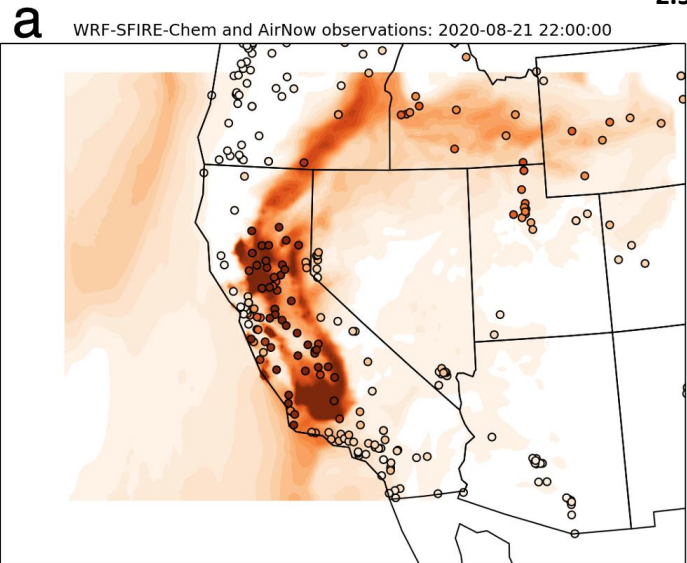
Wrażliwość stężenia dymu powierzchniowego na strumień emisji



Wpływ dymu z pożarów na troposferyczny ozon

PM_{2.5}

Ozon



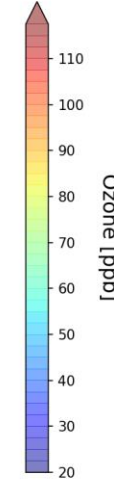
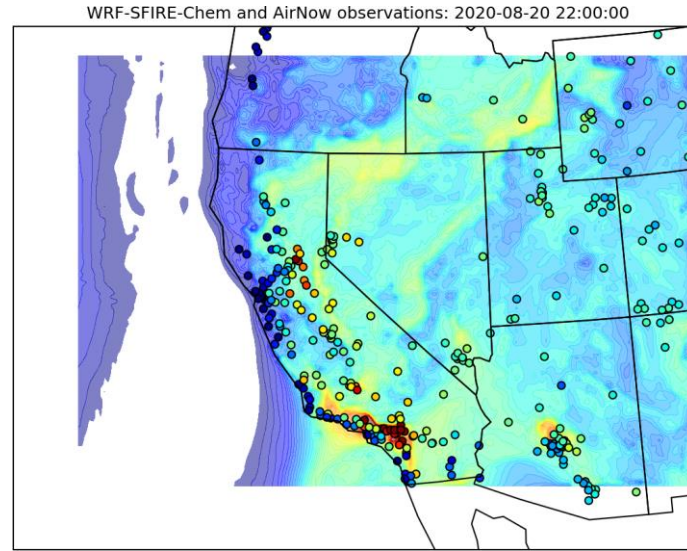
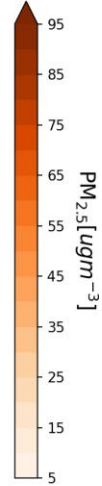
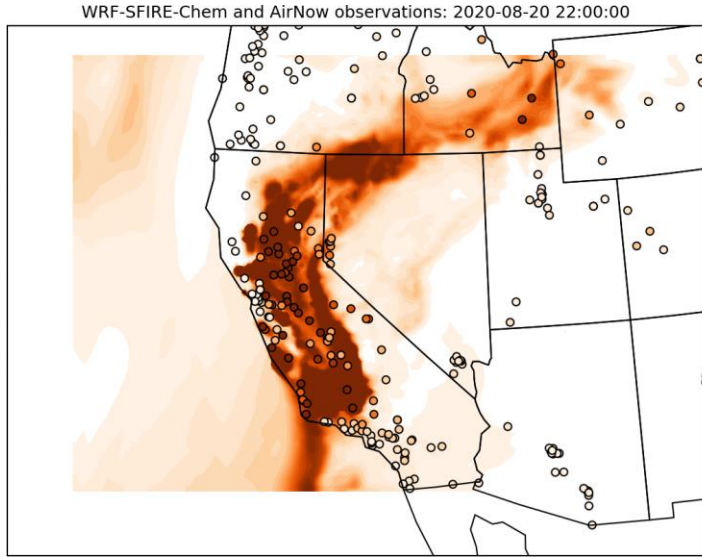
- Pożary w zachodnich Stanach Zjednoczonych nie tylko zwiększyły stężenia pyłów zawieszonych PM_{2.5}, ale także **ozonu** od 5 do 20 ppb

Wpływ dymu z pożarów na troposferyczny ozon

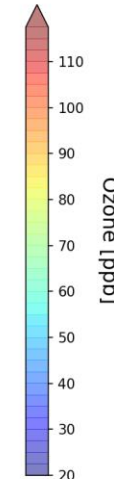
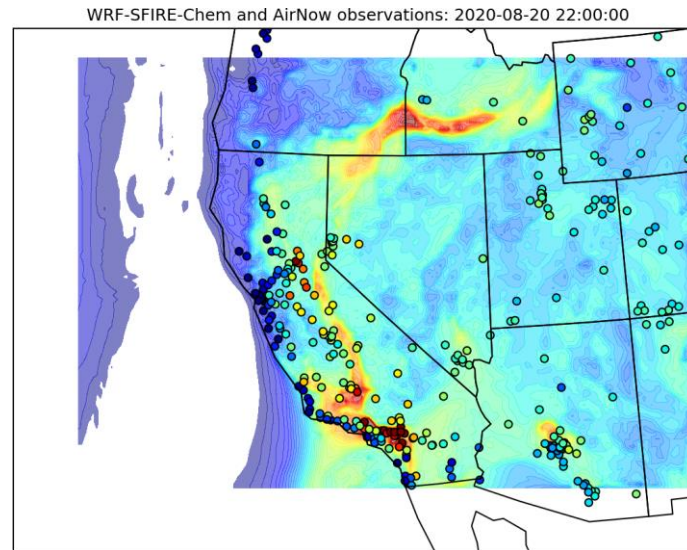
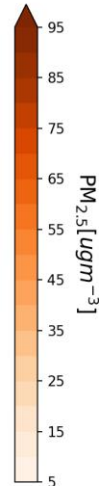
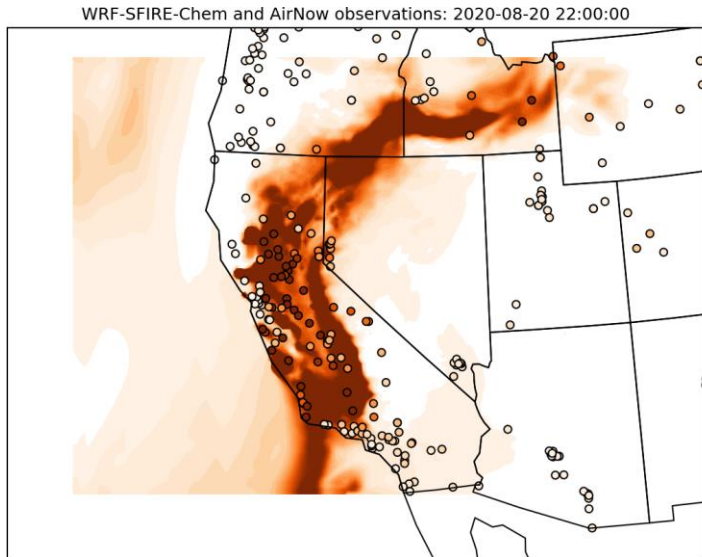
PM_{2.5}

Ozone

Z efektem dymu na nasłonecznienie



Bez efektu dymu na nasłonecznienie



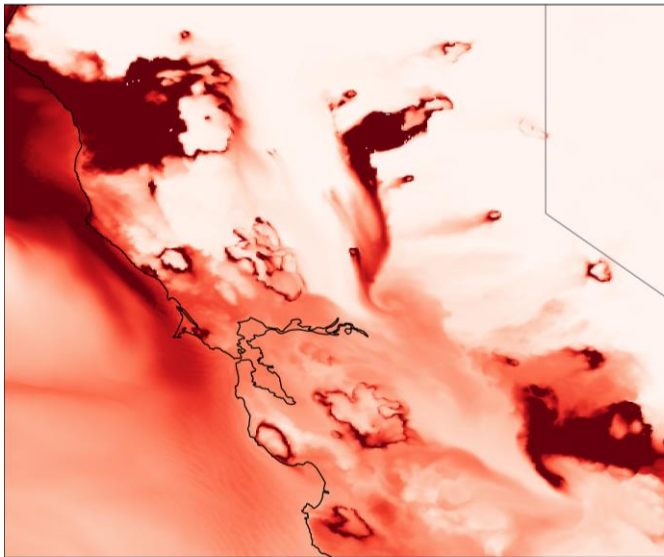
- Wygenerowane symulacje z efektami (u góry) i bez cieniowania dymu (na dole)
- Radiacyjny efekt dymu może drastycznie wpłynąć na jego transport, a także zmienić czasoprzestrzenny rozkład ozonu

Wpływ dymu z pożarów na wiatr i temperaturę

- Obecność dymu znacząco zmienia rozkład temperatury i prędkości wiatru
- Nawet w znacznej odległości od pożaru warunki atmosferyczne są zmodyfikowane przez dym
- Redukcja prędkości wiatru osiąga 3 m/s
- Redukcja temperatury sięga ponad 4 stopni Celcjusza.

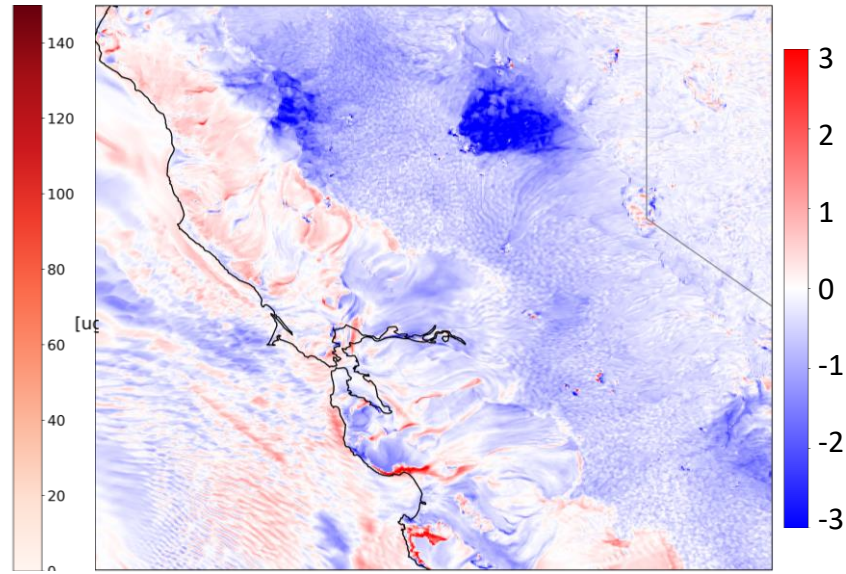
SVM-SFIRE PM2.5

SFIRE PM2.5



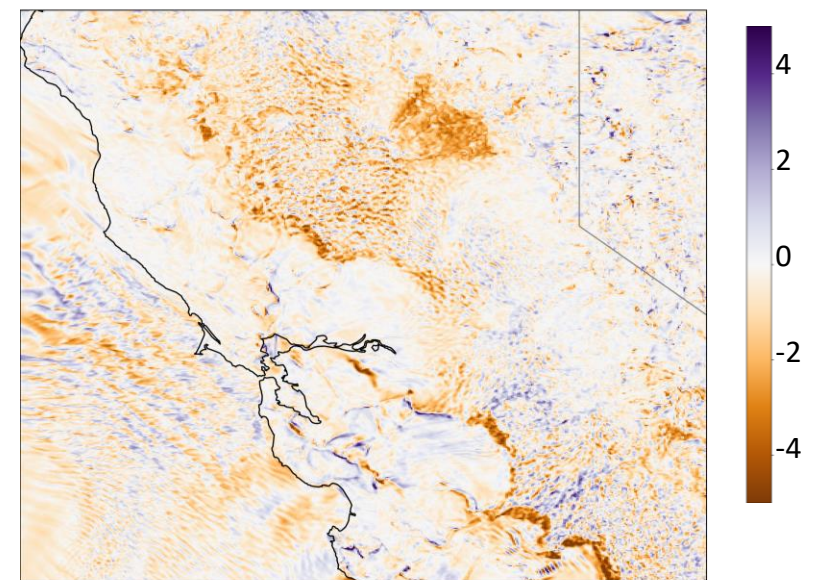
Windspeed Difference(FIRE – NOFIRE)

[m/s]



Temperature Difference (FIRE – NOFIRE)

[K]





Podsumowanie:

- Oddziaływania pożar-atmosfera znacząco modyfikują lokalne warunki wiatrowe
- Natura tych interakcji jest złożona, w małych odległościach od pożaru dominuje efekt kominowy który generuje dodatkowy wiatr pożarowy przyspieszający propagację frontu pożarowego
- Podobny efekt ma miejsce w przypadku dużych pożarów przy słabym wietrze, kiedy pole wiatru jest modyfikowane (głównie lokalnie) w wyniku silnej konwekcji pożarowej
- W przypadku pożarów dominowanych przez wiatr, modyfikacje wiatru mogą mieć mniej lokalny charakter
- Dymu pożarowy obniża temperaturę powierzchni, redukuje wiatr i zwiększa akumulację dymu przy powierzchni w wyniku pozytywnego sprzężenia zwrotnego
- Pożary mogą także tworzyć chmury (typu Pyrocumulonimbus) i generować opady atmosferyczne w obszarach przy aktywnym pożarze