



Technologie informacyjne w predykcji pogodowych zagrożeń w ruchu drogowym

dr hab. inż. ANDRZEJ W. MITAS prof. Pol. Śl.¹⁾, dr MARCIN BERNAŚ²⁾, dr inż., MARCIN BUGDOL³⁾,
mgr inż. ARTUR RYGUŁA²⁾,

¹⁾ Instytut Maszyn Matematycznych, Warszawa, ²⁾ Politechnika Śląska, Katowice, ³⁾ Politechnika Śląska, Gliwice

Systemy ochrony pogodowej stają się nierozłącznym elementem infrastruktury drogowej. Ten stan rzeczy wymuszony jest przez wielomilionowe straty oraz ofiary śmiertelne będące skutkiem wpływu pogody na ruch drogowy. Dla przykładu wystarczy wymienić tu wielo-pojazdowe kolizje na oblodzonej nawierzchni oraz pogodowe uszkodzenia infrastruktury drogowej. Obecnie realizowanych jest wiele projektów dla prognozy i predykcji zagrożeń na drogach o zasięgu punktowym, a także regionalnym lub globalnym – w skali całego kraju. Artykuł prezentuje wspólne elementy tych systemów, propozycję integracji systemu ochrony pogodowej oraz wyniki prac wstępnych.

Metody prognozowania pogody

Tradycyjne prognozowanie pogody realizowane jest poprzez długotrwałe nanoszenie na mapy synoptyczne pomiarów, które odpowiadają za ilość opadów, siłę i kierunek wiatru oraz wartości temperatur. Opracowana w ten sposób mapa jest podstawą do prognozowania warunków atmosferycznych przez synoptyków. Ich doświadczenie wpływa na poprawność prognozy oraz jej powtarzalność.

Matematyczny model różniczkowy

Przy tworzeniu numerycznej prognozy pogody wykorzystuje się komputery dużej mocy. Obliczenia pogodowe opierają się na skomplikowanych równaniach opisujących sposób zachowania się atmosfery. Stan atmosfery opisany jest równaniami różniczkowymi – układem równań nieliniowych [1]. Podstawowy układ równań zawierający zasadę zachowania pędu, zasadę zachowania energii oraz równanie ciągłości, uzupełniony równaniem konstytutywnym (np. równaniem gazu doskonałego dla powietrza) nosi nazwę „równań pierwotnych” lub równań Naviera-Stokesa (1)):

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{u}}{dt} + 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{u} &= -\frac{1}{\rho} \nabla p - \nabla \Phi + F_k \\ c_p \frac{dT}{dt} - \omega \omega &= Q + F_T \\ \frac{d\rho}{dt} &= -\rho \nabla \cdot \mathbf{u} \end{aligned} \quad (1)$$

Pierwszą pracę z algorytmem predykcyjnym dla systemów opartych o równania nieliniowe (różniczkowe) opublikowali Mayne i Michalska: Receding Horizon Control of Non-linear Systems w roku 1990. Obszerne omówienie algorytmów predykcyjnych dla liniowych i nieliniowych systemów dyskretnych w czasie zaproponowali kolejno Kwon i Han (w 2005 roku), Tadjewski (w 2002 roku) oraz Maciejowski (w 2002 roku). Dowiedziono, że precyzyjne przewidywanie zachowania nieliniowego układu nie jest możliwe i rośnie wraz z horyzontem predykcji. We współczesnych modelach opisujących zmiany pogodowe uwzględnia się: równania hydrodynamiki, równania termodynamiki, prawa transferu radiacyjnego, własności składników atmosfery, pro-

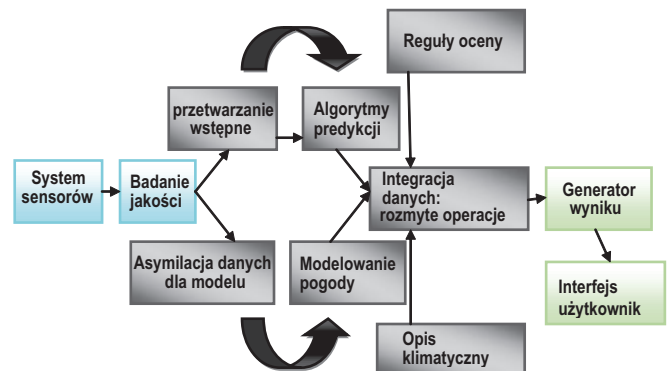
mieniowanie słoneczne, oddziaływanie z podłożem oraz przemiany chemiczne.

Do najpopularniejszych modeli numerycznych opisujących pogodę na kuli ziemskiej możemy zaliczyć następujące modele makroskopowe [18]: Global Forecast System (GFS), Global Environmental Multiscale Model (GEM), Unified Model (UM), Intermediate General Circulation Model (IGCM). Oprócz modeli globalnych opracowano szereg modeli do dokładniejszego opisu wybranego obszaru. Do takich modeli (w tym obejmujące obszar Polski) należą: Weather Research and Forecasting model (WRF), North American Mesoscale model (NAM), Regional Atmospheric Modeling System (RAMS), Fifth Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), oraz wykorzystywany w Polsce model ALADIN oraz COMSMO (COSMO-LM).

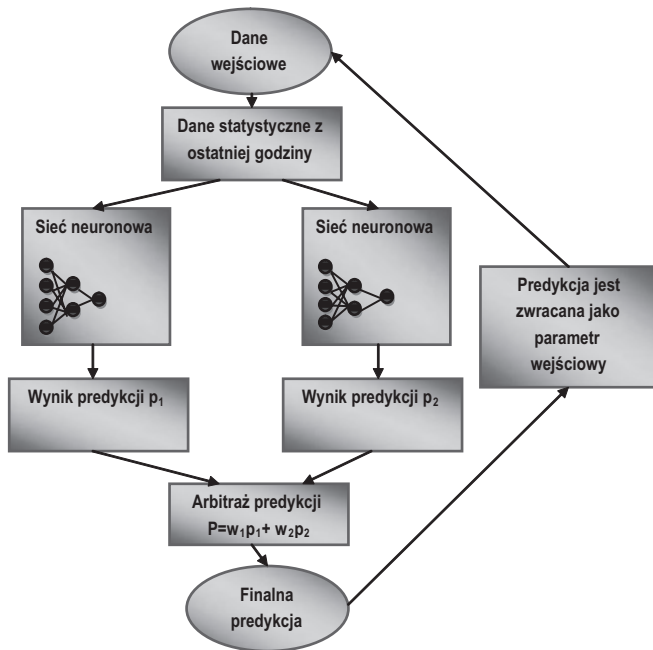
Elementem obligatoryjnym do prognozowania warunków atmosferycznych są warunki początkowe, pochodzące z określonych stacji meteo. W przypadku systemów regionalnych, jak model ICM realizowany przez Uniwersytet Warszawski, warunki brzegowe pobierane są z globalnego modelu UKMO (United Kingdom Meteorological Office) generowanego w angielskim Braknell [19].

Prognozowanie z zastosowaniem algorytmów sztucznej inteligencji i historii zdarzeń

Dla krótkotrwałych prognoz pogody wykorzystywane są także uproszczone modele wykorzystujące mechanizmy sztucznej inteligencji (uczone na danych historycznych danego zjawiska). Podstawowymi narzędziami, powszechnie stosowanymi w nauce oraz, coraz częściej w rozwiązaniach przemysłowych, są systemy ekspertowe, drzewa decyzyjne, sterowanie rozmyte, algorytmy genetyczne oraz sieci neuronowe.



Rys. 1. Detekcja z zastosowaniem wnioskowania rozmytego
Fig. 1. Fuzzy logic detection system



Rys. 2. Detekcja z zastosowaniem sieci neuronowych [12]
Fig. 2. Detection with the use of neural network [12]

Opracowanie systemu opartego na elementach sztucznej inteligencji wymaga pozyskania „wiedzy”. Za wiedzę do nauki można uznać fakty, opinie ekspertów, przykłady zawarte w artykułach badawczych, a także serie danych pogodowych poddanych obróbce statystycznej.

Z wyżej wymienionych technologii najwięcej opracowań i tym samym najlepsze wyniki osiągnięto stosując dwie techniki – systemy ekspertowe (rys. 1) [8] z późniejszym ich rozszerzeniem o wnioskowanie rozmyte [9, 10].

Zbiory rozmyte umożliwiają wnioskowanie na danych obarczone niepewnością lub błędami pomiarowymi.

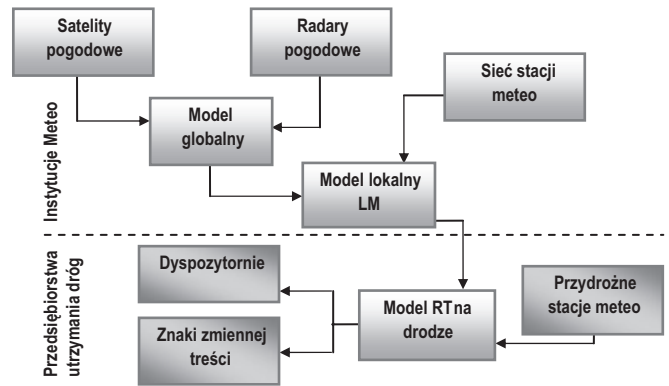
Drugą metodą wykorzystywaną do prognozowania i wnioskowania jest sieć neuronowa (rys. 2) [11, 12, 14]: wielowarstwowa sieć perceptronów (MLPN), rekurencyjna sieć neuronowa Elmana (ERNN), Radialna sieć funkcji prostych (RBFN) oraz model Hopfielda (HFM).

Za stosowaniem systemów ekspertowych przemawia przejrzystość bazy wiedzy (reguł wnioskowania) oraz możliwość analizy czynników wpływających na diagnozę. Natomiast za sieciami – prostota uczenia się oraz budowy takiego systemu. Na bazie tych technologii powstało kilka rozwiązań powszechnie stosowanych w Stanach Zjednoczonych oraz Europie [13–15].

Systemy ochrony pogodowej

Modele globalne oraz ich dane mogą służyć, jako dane wejściowe oraz brzegowe dla modeli obszarowych – wykorzystywanych w Polsce. Wyjścia modeli w zależności od siatki 4...13 km, stanowią kolejne wejście dla modeli prognozy pogodowej na drogach (RT). Propozycja takiego modelu przedstawiona została na rys. 3.

Realizowane są próby przerzucenia predykcji pogodowej na drogach na barki rozszerzonego modelu regionalnego (rezygnujące z modelu RT) do zarządzania m.in. flotą solarek i piaskarek.



Rys. 3. Integracja modeli pogodowych dla zagrożeń drogowych
Fig. 3. Integration of weather models for road hazards

Badania termiczne nawierzchni

Dla prognozy lokalnej wykorzystywane są pionowe jedno lub wielowymiarowe modele gleby. Dominującym modelem, wykorzystywanym do badania zmian temperatury nawierzchni, jest model SHAW'a zaadoptowany do struktury drogi. Modele te najczęściej budowane są dla miejsc szczególnie niebezpiecznych a następnie ich wyniki, poprzez mapy termiczne, propagowane są na liniowe odcinki dróg.

Na rozkład temperatury nawierzchni wpływa wiele czynników takich jak pora dnia, pora roku, zachmurzenie, opad atmosferyczny, kierunek i siła wiatru. Dodatkowo, obserwujemy zmiany rozkładu tych wartości w czasie. Taką zmienność nazywamy wahaniem przestrzennymi temperatury nawierzchni, które spowodowane są, dodatkowo, takimi czynnikami jak: położenie geograficzne, rodzaj nawierzchni, podbudowy, ukształtowanie pionowe terenu, zagospodarowanie terenu czy wreszcie natężenie ruchu pojazdów odpowiedzialnych za emisję ciepła. Zmiany właściwości termicznych drogi na długości kilku kilometrów mogą sięgać nawet kilkunastu stopni Celsjusza [20].

Cechy wykorzystywane dla predykcji pogody na drogach

W celu wyznaczenia warunków panujących na jezdni (sucha, mokra, lód lub śnieg), które są zmienne każdego dnia i w nocy, należy uwzględnić [2, 3, 17] strukturę drogi, lokalną topologię, natężenie ruchu a także warunki pogodowe. Zarówno struktura drogi jak i topologia mogą zostać potraktowane, jako czynniki stałe (niezmienne). Natomiast natężenia ruchu jak i pogoda są zmienne w cyklach dziennych i tak należy je analizować [5]. Pogoda dodatkowo waha się w zależności od frontów pogodowych, do detekcji których wymagana jest regionalna prognoza pogody. W nowoczesnych systemach ITS należy uwzględnić następujące czynniki (tabela) [4, 6, 17]:

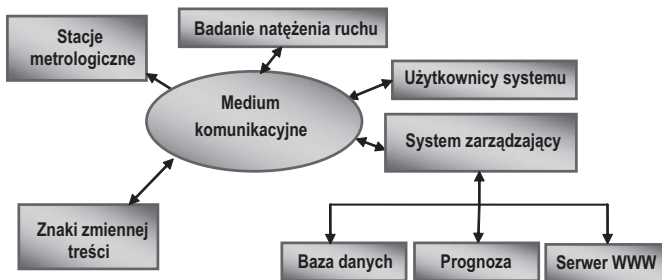
Systemy meteorologii drogowej w Stanach Zjednoczonych i części państw europejskich są nieodzowną częścią zintegrowanych systemów zarządzania ruchem – jako platforma monitorowania warunków pogodowych oraz narzędzie dla ostrzegania i prognozowania o niebezpiecznych zjawiskach pogodowych.

Zgodnie z opracowaniem [21], na rys. 4 przedstawiono przykład architektury systemu osłony meteorologicznej. Opiera się ona na zestawie parametrów zamieszczonych w tabeli, które umożliwiają prognozowanie o stanie nawierzchni: temperaturze, przyczepno-



Czynniki wpływające na warunki pogodowe
Factors affecting weather conditions

| Metrologiczne | Geograficzne | Roboty drogowe |
|---|-------------------|--------------------------------------|
| promieniowanie słoneczne | długość/szerokość | głębokość konstrukcji |
| promieniowanie ciepłe/długofalowe nawierzchni | wysokość | przewodność cieplna |
| temperatura powietrza | topografia terenu | dyfuzyjność |
| zachmurzenie i jego typ | ekranowanie | zdolność do wypromieniowania energii |
| prędkość wiatru | widoczność nieba | barwa nawierzchni |
| wilgotność/punkt rosy | pokrycie terenu | natężenie ruchu |
| deszcz | | |



Rys. 4. Przykład architektury systemu ochrony meteorologicznej [21]
Fig. 4. Example of meteorological protection system architecture [21]

ści lub widoczności. Największy wpływ na mapę termiczną ma widoczny obszar nieba (*sky-view factor*), choć wysokość, topografia, zagospodarowanie terenu, struktura drogi oraz natężenie ruchu także mają również istotny udział w uzyskanym końcowym wyniku pomiaru.

Uzupełnieniem bazy pomiarowej są pomiary z czujników widoczności, nasłonecznienia oraz wartości natężenia ruchu. Przy przesyłaniu danych wykorzystywane są łącza komunikacyjne dedykowane – będące integralną częścią infrastruktury drogowej (jak światłowody w kanałach technicznych) lub łącza publiczne jak GPRS czy sieć Internet.

Technologie wspierające predykcję pogodową

Coraz częściej pojazdy dostrzegane są jako potencjalne źródło informacji o warunkach drogowych. Takimi danymi mogą być informacje z systemów antypoślizgowych (ABS) lub kontroli trakcji (ASR, ESR). Dzięki sieciom samochodowym Ad-hoc lub VANET, poruszające się pojazdy można potraktować jako węzły do wymiany danych pomiędzy infrastrukturą drogową. W sieciach VANET pojazdy oddalone od siebie o 100...300 m tworzą sieć o szerokim zakresie.

Do budowy sieci VANET lub inteligentnej sieci samochodowej ad-hoc (InVANETs) wykorzystuje się następujące standardy: WiFi IEEE 802.11p, WAVE IEEE 1609, WiMAX IEEE 802.16, Bluetooth, IRA oraz ZigBee.

Sieci VANETs są traktowane jako element nowoczesnego inteligentnego systemu transportowego (ITS). Jako jego podstawę

uznaje się elementy wymiany danych (także pogodowych): Inter-vehicle communication (IVC) oraz komunikację ze stacjami bazowymi: road to vehicle communication (RVC).

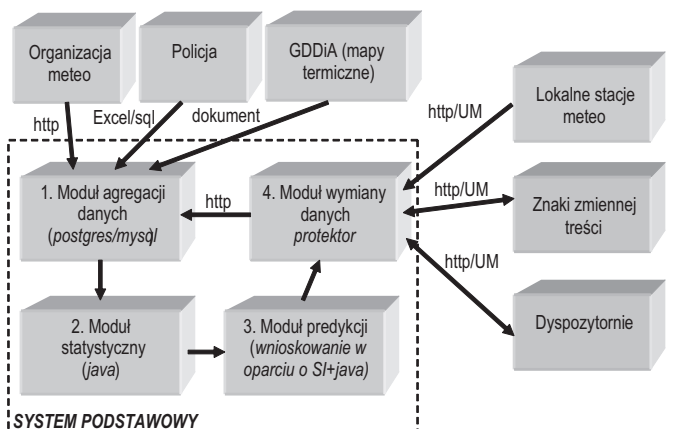
Propozycja realizacji systemu detekcji zagrożeń

System, analogicznie do licznych rozwiązań, powinien składać się z modułów. Podstawowymi modułami, wchodzącymi w skład systemu detekcji zagrożeń, są:

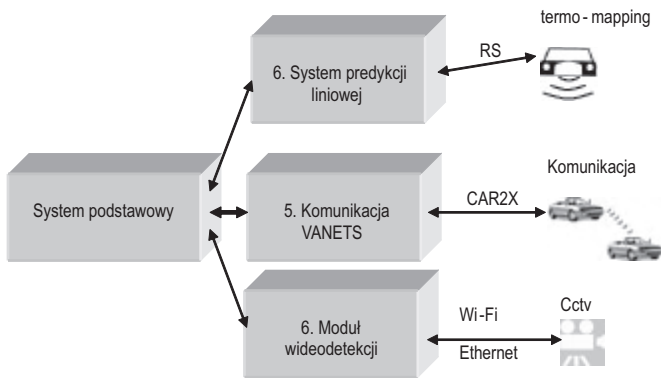
- moduł gromadzenia danych – zawierający dane zarówno z poszczególnych stacji pogodowych, modelu prognozy pogody jak i dane o wypadkach. Dane powinny być powiązane poprzez położenie geograficzne jak i datę/czas zdarzenia. Opcjonalnie baza może zawierać ustandaryzowane zmiany poszczególnych czynników pogodowych na odcinkach dróg. Takie dane same w sobie będą jednak obciążone błędem pomiarów jak i zmiennością ich wartości w czasie;
- moduł statystyczny – generujący podstawowe miary parametrów dla systemu wnioskowania. Parametry te umożliwią strojenie systemu wnioskowania o zagrożeniach oraz mogą być wykorzystane do opisu oraz prezentacji danych użytkownikowi;
- moduł wykrywania zagrożeń – badający zmiany pogodowe oraz, na podstawie dostępnych danych, oferujących diagnozę z jej opisem – prawdopodobieństwo wystąpienia lub opis przesłanek. Dane te są wyznaczane na podstawie modelu termicznego jak i historii pomiarów. Przy predykcji brana jest pod uwagę krótkotrwała dynamika zmian (15 min) oraz trendy zmian w ciągu doby;
- moduł komunikacji systemu ze znakami zmiennej treści, stacjami pogodowymi oraz dyspozytorniami.

Dodatkowo system może zostać uzupełniony następującymi elementami:

- moduł predykcji liniowej na podstawie danych uzyskanych z mobilnych stacji pogodowych lub map termicznych;
- moduł pozyskiwania informacji z systemów VANETs o wypadkach, natężeniu ruchu, pojazdach uprzywilejowanych oraz zdarzeniach a także o profilu termicznym drogi;
- moduł wideo-detekcji zmiennych warunków oraz widoczności. Proponowane rozwiązanie charakteryzuje się możliwością jego rozbudowy o inne dziedziny bezpieczeństwa, takie jak detekcję wypadków oraz zatrzymanych pojazdów. Schemat podstawowego oraz rozszerzonego rozwiązania przedstawiono na rys. 5 oraz rys. 6.



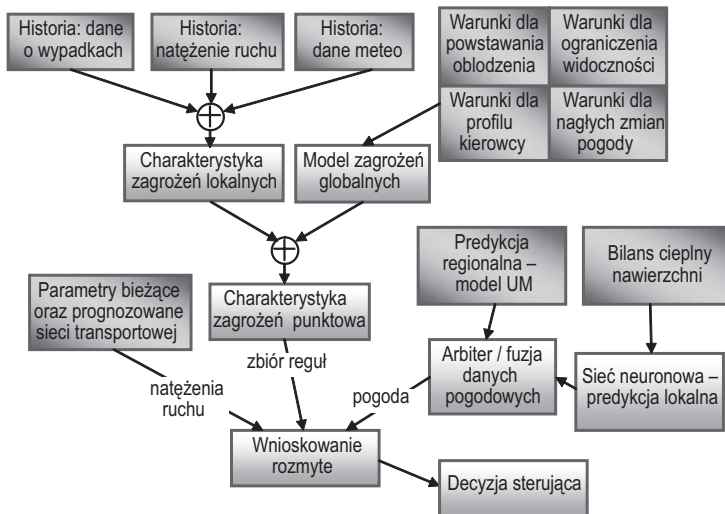
Rys. 5. Schemat modelu wstępnego. Fig. 5. Preliminary model



Rys. 6. Schemat modelu rozszerzonego. Fig. 6. Extended model

Moduł predykcji zagrożeń pogodowych na drodze

Moduł będący sercem systemu opiera się na algorytmach sztucznej inteligencji jak i bilansie cieplnym nawierzchni w celu weryfikacji danych pozyskanych z regionalnego numerycznego modelu predykcji pogody. Na podstawie analizy literaturowej oraz przeprowadzonych wstępnych badaniach zaproponowano następujący schemat działania systemu (rys. 7):



Rys. 7. Model predykcji zagrożeń pogodowych na drodze Fig. 7. Road weather hazards prediction model



Rys. 8. Interfejs systemu ostrzegania. Rys. 8. Interface of warning system

Model w założeniu powinien adaptować się do charakterystyki lokalnej, dla której generowana jest decyzja sterująca. Decyzje sterujące wysyłane są w formie ostrzeżeń lub zaleceń dla dyspozytorni, informacji na znakach zmiennej treści lub za pomocą sieci VANET do poszczególnych pojazdów (np. jadących ze zbyt dużą prędkością).

Na podstawie danych uzyskanych z Systemu Ewidencji Wypadków i Kolidacji (SEWIK), danych z lokalnej stacji meteo oraz danych prognostycznych modelu regionalnego dokonano implementacji modelu ostrzegania przed zagrożeniami pogodowymi. System opracowany został w oparciu o reguły rozmyte oraz przesłanki zdefiniowane w pracach [2–7, 16]. Wartości dla reguł skalibrowano w oparciu o historię wypadków w obszarze pracy lokalnej stacji meteo. Aplikacja wyświetla prognozę co pół minuty w zdefiniowanej postaci graficznej (rys. 4).

Testy wstępne zostały przeprowadzone dla danych uzyskanych z lokalnej stacji pogodowej. System generuje ostrzeżenia dla niekorzystnych zmian atmosferycznych takich jak: oblodzenie, silny wiatr boczny oraz ograniczona widoczność. Ze względu na brak czujnika widoczności posłużono się poziomem względnej wilgotności oraz wielkością opadów atmosferycznych. Badania pilotażowe wykazały 95% skuteczności modelu dla detekcji niekorzystnych warunków pogodowych, w których wystąpiły kolizje drogowe.

Podsumowanie

Wpływ pogody na stan bezpieczeństwa na drodze jest oczywisty. Niemniej jednak nie trudno zauważyć, już choćby na podstawie doniesień medialnych, że paradoksalnie najczęściej zdarzeń drogowych występuje przy dobrej pogodzie w godzinach szczytu. W oczywisty sposób utrudnia to identyfikację tzw. warunków niebezpiecznych wyłącznie na podstawie analizy historycznej wypadków. Można przyjąć, że ten jest niekorzystny zarówno dla pogody określanej w pojęciach rozmytej logiki jako „bardzo dobra” jak i „bardzo zła”. W każdym przypadku zadaniem lub też przywilejem użytkownika byłoby przyjęcie odpowiedniej taktyki w rozwiązywaniu problemu marszrutowania z wykorzystaniem aktualnej informacji o pogodzie oraz o tendencjach jej zmiany w przewidywanym czasie transportu do celu podróży. Taka funkcja celu uzasadnia kosztowne użycie wspomaganie telepatycznego transportu oraz wypracowanie złożonych modeli przewidywania zmian pogody.

Koncepcje predykcji zagrożeń pogodowych mają swoją realizację jako systemy wnioskowania oparte o dane z lokalnych stacji meteo, bilans cieplny nawierzchni oraz model trójwarstwowy. W modelu tym pierwsze dwie warstwy stanowią numeryczną predykcję globalną oraz regionalną, która realizowana jest przez specjalistyczne centra obliczeniowe (np. IMGW oraz ICM). Trzecia warstwa realizuje predykcję zagrożeń (w tym także sterowanie znakami zmiennej treści) na podstawie danych z lokalnych stacji meteo oraz wyników działania modelu regionalnego.

Modele wazenia zagrożeń opierają się o moduł statystyczny oraz moduł prognostyczny, wzbogacony o dane z modeli predykcji regionalnych, z zastosowaniem technik sztucznej inteligencji (systemy ekspertowe, wnioskowanie rozmyte, sieci neuronowe). Do określania punktów szczególnie zagrożonych wykorzystuje się często mapy termiczne. Implementacja predykcji globalnej i regionalnej charakteryzuje się wysoką ceną zarówno samych danych jak i obsługi modelu. Liczne opisy systemów predykcyjnych za-



grożeń pogodowych na świecie uwzględniają ocenę ryzyka w oparciu o systemy ekspertowe, sieci neuronowe, czy logikę rozmytą.

Dla właściwej predykcji w oparciu o bilans cieplny istotne znaczenie mają aktualne warunki atmosferyczne. Implikuje to instalację dodatkowych czujników np. czujnika nasłonecznienia oraz dostosowania do specyfiki terenu a także informacji o rodzaju i stanie nawierzchni.

Dynamiczny rozwój technologii VANETs oraz sieci wehikularnych umożliwi udostępnienie danych pogodowych oraz informacji o śliskiej nawierzchni z systemów kontroli trakcji pomiędzy pojazdami jak i do centrum zarządzania. Warunkuje to płynne pozyskiwanie on-line aktualnych danych, kluczowych dla poprawności wnioskowania. Odrębnym zadaniem systemów zarządzania ruchem drogowym jest sprawna redystrybucja informacji.

Literatura

- [1] Pielke R.: Mesoscale Meteorological Modeling. Academic Press (2002), pp. 18–19.
- [2] Al Hassan Y., Barker D. J.: The Impact of Unseasonable or Extreme Weather on Traffic Activity within Lothian Region, Scotland. *Journal of Transport Geography* 7.3 (1999), pp. 209–213.
- [3] Sandeep D., Sharma S.: Impact of Cold and Snow on Temporal and Spatial Variations of Highway Traffic Volumes. *Journal of Transport Geography* 16.5 (2008), pp. 358–72.
- [4] Eisenburg D: The Mixed effects of Precipitation on traffic Crashed. *Accident Analysis & Prevention* 36.1 (2004), pp. 637–647.
- [5] Hranac R, et al.: Empirical Studies on Traffic Flow in Inclement Weather. FHWA. 2006.
- [6] Keay K, Simmonds I.: The Association of Rainfall and Other Weather Variables with Road Traffic Volume in Melbourne, Australia. *Accident Analysis & Prevention* 37.1 (2005), pp. 109–24.
- [7] ZEUS Polish Road Safety Project 2011: <http://www.e-zeus.eu/index.php/pl/zeus-projekt.html>
- [8] Sujitjorn S., Sookjaras P., Wainikorn W.: An expert system to forecast visibility in Don-Muang Air Force Base. *Systems, Man, and Cybernetics*, 1994. Humans, Information and Technology, rel. 2002.
- [9] Rahman S., Bhatnagar R.: An expert system based algorithm for short term load forecast. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3 issue 2, (1988), pp. 392–399.
- [10] Riordan D., Hansen B.K.: A fuzzy case-based system for weather prediction. *Engineering Intelligent Systems*, vol. 3, issue 3, (2002), pp. 139–146.
- [11] Hall T.: Precipitation forecasting using a neural network. *Weather and Forecasting*, Boston, vol. 14, issue. 3; (1999) pp. 338–346.
- [12] Marzban C.: A Bayesian neural network for severe-hail size prediction. *Weather and Forecasting*, Boston, vol. 16, issue 5, (2001), pp. 600–611.
- [13] Intelligent Weather Systems, RAP, NCAR: <http://www.rap.ucar.edu/technology/iws>
- [14] Krasnopolsky V.M., Chevallier F.: Some neural network applications in environmental sciences: Advancing computational efficiency of environmental numerical models. Technical Memorandum No. 359, European Centre for Medium-Range Weather Forecast.
- [15] Doms G., Forstner J., Development of a kilometer-scale NWP-System: LMK. COSMO Newsletter No. 4, Deutscher Wetterdienst, (2004), pp. 159–167.
- [16] Institute for Road Safety Research: The influence of weather on road safety. Swov, Leidschendam, Netherlands (2009).
- [17] RWIS guidebook: http://www.sirwec.org/documents/rwis_web_guide.pdf
- [18] Numeryczne modele pogody: http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_numerical_weather_prediction
- [19] Naukowcy i studenci z ICM UW opracowują numeryczne prognozy pogody: <http://edukacjapolsce.pl/modules.php?op=modload&name=News&file=article&sid=625>
- [20] Ząbczyk K., Pierzchała K.: Mapy termiczne sieci drogowej: http://inframedia.pl/article_advances/category/technologie/1/mapy_termiczne_sieci_drogowej
- [21] Ząbczyk K.: Metrologia drogowa z bezpieczeństwo ruchu: http://www.signalco.pl/data/dokumenty/meteorologia_drogowa_a_bezpieczenstwo_ruchu.pdf