

## **Niskokosztowe ramy IoT do przewidywania osuwisk i informowania o ryzyku**

Osuwiska są niepewnymi zdarzeniami geologicznymi i stanowią wielkie zagrożenie dla życia i infrastruktury. W Indiach, zwłaszcza w regionie Himalajów, osunięcia ziemi są częstsze niż jakiegokolwiek inne zjawiska geologiczne powodujące ponad 200 zgonów i średnio 82 mln USD szkód w infrastrukturze rocznie. Ze względu na duże koszty i wiele zgonów spowodowanych osuwiskami, istnieje potrzeba zaprojektowania i opracowania ram, które monitorują osuwiska i ostrzegają ludzi przed ich wystąpieniem. Aby były skuteczne, ramy te powinny charakteryzować się następującymi cechami: wykrywanie właściwości gleby i ruchu gleby w miejscach podatnych na osuwiska; dane rejestrowane w dzienniku w zdalnej lokalizacji za pośrednictwem infrastruktury chmury; umożliwiają analizę zarejestrowanych danych; i czuje się ludzi za pośrednictwem aplikacji mobilnych przed wystąpieniem osuwisk. Zaproponowano kilka technik monitorowania osuwisk. Niektóre z tych technik obejmują wykorzystanie stereoskopowych zdjęć lotniczych; wykorzystanie teledetekcji satelitarnej i bezzałogowych statków powietrznych (UAV); wykorzystanie cyfrowych modeli wysokościowych (DEM) z danych z lotniczej wysokościomierza laserowego; oraz zastosowanie metody optycznej reflektometrii w dziedzinie czasu Brillouina. Chociaż techniki te zapewniają skuteczne technologie monitorowania osuwisk, skanują tylko powierzchnię terenu i są drogie w użyciu. Ramy IoT stanowią podstawę do łączenia czujników, siłowników i innych inteligentnych technologii, a tym samym pomagają ulepszyć automatyzację i kontrolę w różnych operacjach. Te ramy IoT mogą zapewnić alternatywne rozwiązania do monitorowania osuwisk. W ciągu ostatnich kilku lat naukowcy zaprojektowali i opracowali pewne ramy IoT do monitorowania osuwisk i ostrzegania ludzi. Te ramy IoT obejmują zbieranie danych, transmisję, wstępne przetwarzanie, uczenie maszynowe, podejmowanie decyzji i rozpowszechnianie informacji za pośrednictwem aplikacji mobilnych. Tak więc te ramy IoT wykraczają poza typowe sieci czujników bezprzewodowych (WSN), które składają się wyłącznie z czujników, które zbierają dane i przesyłają je bezprzewodowo. Jednak te struktury wykorzystują kosztowne komponenty pomiarowe, takie jak geofony, przetworniki ciśnienia porowego i mierniki nachylenia. Wysoki koszt wykrywania osuwisk za pośrednictwem istniejących platform IoT ogranicza ich wdrażanie na dużą skalę na kilku obszarach na świecie narażonych na osuwiska. Dlatego istnieje potrzeba projektowania i rozwijania frameworków IoT, które są tanie, ale wydajne. Jednym ze sposobów obniżenia kosztów jest zastosowanie czujników opartych na systemach mikroelektromechanicznych (MEMS) (Gupta i Ahmad, 2007) jako części istniejących ram IoT do wykrywania osuwisk. MEMS to technologia wykorzystująca postępy w technikach wytwarzania do osadzania systemu elektromechanicznego na jednym chipie. W czujnikach opartych na MEMS elementy mechaniczne, takie jak koła zębate i belki, są dodawane na górze systemów elektrycznych, gdzie ta kombinacja elektromechaniczna pozwala wyczuć świat fizyczny. Struktury IoT obejmujące czujniki oparte na MEMS mogą być przydatne do monitorowania osuwisk. Jednak czujniki używane do monitorowania osuwisk w rzeczywistym świecie muszą być najpierw skalibrowane i przetestowane w skali laboratoryjnej. Tu omówiono projektowanie i rozwój niskokosztowych ram IoT do monitorowania osuwisk. Ramy te obejmowały wykorzystanie czujników opartych na MEMS do monitorowania osuwisk w skali laboratoryjnej. Proponowane ramy mogą monitorować wilgotność i ruch gleby oraz generować ostrzeżenia na podstawie wcześniej zdefiniowanych progów.

## Tło

Jak wspomniano wcześniej, do monitorowania osuwisk wykorzystano kilka technologii. Choć te technologie zapewniają różne metody monitorowania osuwisk, mogą jedynie skanować powierzchnię terenu i są drogie w użyciu. Na przykład w mieście Portland, gdzie do monitorowania osuwisk używano DEM, sam koszt mapowania wynosił od 400 do 600 dolarów za milę kwadratową. Ten wysoki koszt mapowania był powodem, dla którego Portland nie było w stanie pozwolić sobie na wdrożenie DEM na dużą skalę. Podobnie wysokie koszty i ograniczenia operacyjne wiążą się z UAV, co ogranicza ich wykorzystanie. Wysoki koszt tradycyjnych technologii monitorowania osuwisk wymaga znalezienia alternatywnych technologii, które są przystępne cenowo i mogą zajrzeć pod powierzchnię terenu. Czujniki oparte na MEMS są wykorzystywane w szerokim zakresie zastosowań obejmujących sektory opieki zdrowotnej, motoryzacji, obrony i komunikacji. Ostatnio czujniki oparte na MEMS zwróciły również uwagę badaczy osuwisk, a platformy IoT, które wykorzystują te czujniki, mogą zapewnić obiecujące, tanie rozwiązania do monitorowania osuwisk. Jednakże, ponieważ skuteczność czujników opartych na MEMS nie została oceniona pod kątem zastosowań osuwiskowych w rzeczywistym świecie, potrzebne są dalsze badania w zakresie projektowania i opracowywania ram IoT, które obejmują wykorzystanie tych czujników. Aby zaprojektować i opracować takie struktury, ważne jest, aby najpierw ocenić możliwości tych czujników za pomocą kontrolowanych symulacji w skali laboratoryjnej, a następnie przetestować je w zastosowaniach terenowych. W poniższej sekcji przedstawiono projektowanie i rozwój platformy IoT, w której zastosowano czujniki oparte na MEMS w skali laboratoryjnej.

## Projektowanie i wdrażanie systemu

Projekt proponowanej platformy monitorowania osuwisk IoT składa się z następujących elementów: jednostki czujnikowej; jednostka rejestracji danych i progowania; oraz jednostkę generującą ostrzeżenia. W tej sekcji znajduje się szczegółowy opis każdego z tych elementów.

### Jednostka czujnikowa

W proponowanych ramach akcelerometry oparte na MEMS i czujniki wilgotności wykrywają odpowiednio ruch gleby (przyspieszenia) i wilgotność gleby. Akcelerometr mierzy przyspieszenia (szybkość zmian prędkości obiektu) w trzech ortogonalnych kierunkach (np. X, Y i Z). W połączeniu z mikrokontrolerem czujnik ten dostarcza analogowe wartości przyspieszenia. Te jednostki analogowe są konwertowane na jednostki „m/s<sup>2</sup>” przy użyciu odpowiedniej procedury kalibracji. Czujnik wilgotności gleby wykorzystuje właściwość rezystancji do pomiaru zawartości wody w glebie otaczającej jej elektrody. Rezystancja jest odwrotnie proporcjonalna do wilgotności gleby i napięcia wyjściowego. Gdy czujnik jest suchy, rejestrowana jest wysoka wartość rezystancji. Ta wartość rezystancji skutkuje niskim napięciem wyjściowym. Natomiast gdy elektrody czujnika są wilgotne, rejestrowana jest niska wartość rezystancji i rezystancja ta skutkuje wysokim napięciem wyjściowym. Wartości analogowe z akcelerometru i czujników wilgotności gleby są podawane na piny analogowe mikrokontrolera, który jest bezpośrednio połączony z tymi czujnikami. Wartości czujników odbierane przez mikrokontroler są wysyłane do chmury za pośrednictwem modułu Global System for Mobile (GSM) (Rahnema, 1993). GSM jest używany do transmisji danych, a nie Wi-Fi, ponieważ w prawdziwym świecie czujnik zostanie zainstalowany na odległym wzgórzu, gdzie sygnał Wi-Fi nie będzie obecny. Jednak sieci GSM (komórkowe) są łatwo dostępne w pagórkowatym terenie, zwłaszcza w Himalajach w Himachal Pradesh, gdzie planowane jest przysze wdrożenie struktury.

### Rejestrowanie danych i jednostka progowa

Moduł GSM odbiera wartości czujników z mikrokontrolera, a następnie przesyła je do bazy danych w chmurze. Ta konfiguracja jest używana w kontrolowanych eksperymentach w skali laboratoryjnej, w których określone wartości krytyczne (tj. próg) są określone dla wilgotności gleby i ruchu gleby. Te wartości progowe po przekroczeniu mogłyby spowodować osuwiska.

### **Jednostka generująca alerty**

Jednostka generująca alerty porównuje wartości czujników z ich wstępnie zdefiniowanymi progami. Gdy wartości czujnika wilgotności gleby lub ruchu gleby przekroczą wartości progowe, urządzenie to generuje alerty SMS dotyczące osuwisk na telefony komórkowe. Jednostka generująca alerty ma również możliwość wstępnej rejestracji numerów telefonów komórkowych do wysyłania alertów SMS.

### **Testowanie platformy IoT**

W tej części omówiono eksperyment laboratoryjny obejmujący proponowane ramy monitorowania osuwisk. Głównym celem eksperymentu było sprawdzenie zdolności ramy do pomiaru wilgotności gleby i ruchu gleby. Drugim celem eksperymentu było zbadanie wartości progowych wilgotności gleby i ruchu gleby, które prawdopodobnie wywołają osuwiska. W doświadczeniu próbkę gleby ze wzgórza upakowano na rampie. Następnie zwiększano poziom wilgotności w próbce gleby, aż do wywołania osuwiska na pochylni. Eksperyment ten posłużył jako weryfikacja koncepcji do testowania przydatności czujników opartych na MEMS do monitorowania osuwisk, a także do pomiaru wartości progowych wilgotności i ruchu gleby.

### **Metodologia**

#### **Charakterystyka gleby**

W celu zbadania progów wilgotności gleby i ruchu gleby za pośrednictwem ramy przeprowadzono eksperyment na rampie obejmującej glebę o określonych właściwościach fizycznych. Najpierw przeprowadzono testy gleby, w których określone właściwości gleby zostały określone przy użyciu procedur standardu indyjskiego (IS). Te procedury IS obejmowały badania ciężaru właściwego (IS 2720-1, 1983), rozkład wielkości cząstek (IS 2720-4, 1985), charakterystykę zagęszczania (IS 2720-8, 1983) oraz test bezpośredniego ścinania (IS 2720-13, 1986). Ciężar właściwy to stosunek gęstości próbki gruntu do gęstości wody w określonej temperaturze. Próbkę gleby poddano dalszej analizie pod kątem zawartości procentowej składników. W celu przeprowadzenia tej analizy przeprowadzono test analizy wielkości ziaren, który dał procenty wielkości żwiru (średnica cząstek > 4,75 mm), rozmiary piasku (średnica cząstek od 0,075 do 4,75 mm), rozmiary mułu (średnica cząstek od 0,075 do 0,0002 mm), i gliny (średnica cząstek < 0,0002 mm) w próbce gleby. Jak pokazano w tabeli 21.1, próbka gleby składała się głównie z cząstek piasku i mułu, a próbka została zaklasyfikowana jako piasek słabo uziarniony. Kąty tarcia pomiędzy cząstkami piasku były większe niż pomiędzy cząstkami piasku a materiałem rampy. Również kohezja pomiędzy cząstkami piasku była nieco większa w porównaniu z kohezją pomiędzy cząstkami piasku a materiałem rampy. Ogólnie rzecz biorąc, cząstki piasku związały się ze sobą znacznie bardziej w porównaniu z ich wiązaniem z materiałem rampy.

#### **Konfiguracja rampy w skali laboratoryjnej**

Do przeprowadzenia eksperymentu z ramą przygotowano drewnianą rampę (patrz rysunek 21.2a). Wymiary rampy były następujące: długość = 1m; szerokość = 0,3 m; i wysokość = 0,3m. Dodatkowo rampa została podparta podporami po obu stronach, tak aby mogła być podnoszona pod różnymi kątami z powierzchnią poziomą (od 1° do 90°). W doświadczeniu glebę upakowano na rampie i dodawano wilgoć za pomocą zraszacza wodnego aż do przemieszczenia gleby i wystąpienia osuwiska. Jak pokazano na rysunku 21.2b, akcelerometry i czujniki wilgotności gleby zostały umieszczone u

podstawy i na górze elastycznej rury na końcu rampy. Czujniki te rejestrowały odpowiednio ruch gleby i wartości wilgotności gleby. Jeden zestaw czujników akcelerometru i wilgotności gleby znajdował się u podstawy rury, a drugi zestaw czujników u góry rury. Rura trzymająca dwa zestawy czujników została umieszczona prostopadle do poziomu gruntu. Cały układ może wykrywać ruch gleby i jej wilgotność oraz przekazywać wykryte wartości do mikrokontrolera. Następnie wartości czujników otrzymane przez mikrokontroler były przesyłane do bazy danych za pośrednictwem infrastruktury chmury i modułu GSM.

### Wybór komponentów dla platformy IoT

Dwa oparte na MEMS akcelerometry i czujniki wilgotności zostały umieszczone u podstawy i na górze elastycznej rury na końcu pochylni. Specyfikacje różnych pozycji wykorzystywanych w tych ramach są omówione w następujący sposób:

\* Akcelerometr. W ramach wykorzystano moduł akcelerometru GY-611. Moduł ten mierzy przyspieszenia trójosiowe w zakresie  $\pm 3$  g (gdzie  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ ) w trzech ortogonalnych kierunkach. Ten czujnik jest urządzeniem małej mocy o napięciu roboczym od 1,8 do 3,6 V i prądzie roboczym 350  $\mu\text{A}$ . Akcelerometr jest kalibrowany przez wyrównywanie każdej jego osi jedna po drugiej z przyspieszeniem grawitacyjnym Ziemi ( $= 9,8 \text{ m/s}^2$ ). Tak więc, gdy oś Z jest zgodna z przyspieszeniem grawitacyjnym Ziemi, akcelerometr podaje przyspieszenie +1 g w osi Z i przyspieszenie 0 g w osiach X i Y. W przypadku akcelerometru umieszczonego w górnej części rury,  $A_x$ ,  $A_y$  i  $A_z$  odnoszą się do kierunków prostopadłych do podstawy pochylni (w górę), wzdłuż szerokości pochylni (od prawej do lewej) i nachylonych pod kątem  $\varphi$  z ziemią z dala od rampy ( $\varphi$  to kąt, w jakim rampa została wykonana w poziomie). Podobnie, w przypadku akcelerometru u podstawy rury,  $A_x$ ,  $A_y$  i  $A_z$  odnoszą się do kierunków prostopadłych do podstawy pochylni (skierowanych w dół), wzdłuż szerokości pochylni (od lewej do prawej) i nachylonych przy kącie  $\varphi$  z gębą odpowiednio w kierunku rampy.

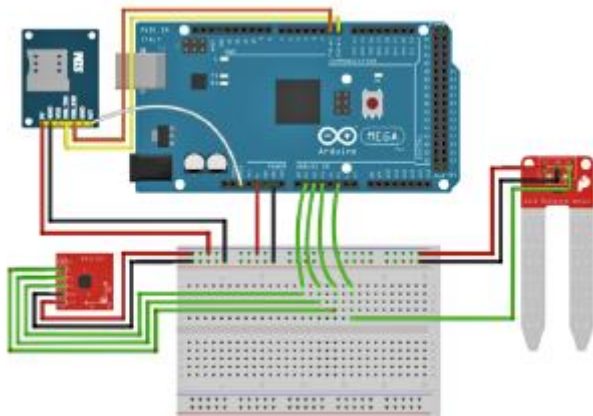
\* Czujnik wilgotności. Do pomiaru procentowej zawartości wilgotności w glebie, w ramie używany jest moduł YL-692 (patrz Rysunek 21.4). Napięcie robocze dla tego czujnika wynosi od 3,3 do 5,0 V. W zależności od poziomu wilgotności w bliskim sąsiedztwie czujnika, czujnik ten podaje wartość analogową od 0 do 1023. Odczyty analogowe dla czujników wilgotności gleby w stanie suchym (0% wilgotności) i stan mokry (100% wilgotności) wynoszą odpowiednio 395 i 1023. Aby obliczyć procentową wilgotność odpowiadającą wartości czujnika analogowego, stosuje się następujące równanie:

$$\text{Procent wilgotności} = (1023 - \text{Wartość analogowa}) / 1023 - 395 \times 100 \quad (1)$$

\* Mikrokontroler. Do odczytu i przetwarzania wartości czujników używana jest płyta mikrokontrolera typu open source, czyli Arduino MEGA 25603. Ten mikrokontroler ma 16 pinów analogowych i 54 pinów cyfrowych. Napięcie i prąd pracy tego mikrokontrolera to odpowiednio 5 V i 500 mA.

\* Moduł GSM. Do przesyłania danych z czujnika do chmury wykorzystywany jest moduł SIM900A GSM. Do mikrokontrolera podłączony jest moduł GSM, który może pracować na czterech różnych częstotliwościach: 850, 900, 1800 i 1900 MHz. Ponieważ moduł GSM pobiera prąd do 2A, zastosowano zewnętrzny zasilacz o napięciu roboczym i prądzie odpowiednio 5V i 2A. Karta ASIM jest wykorzystywana w module GSM do nawiązania bezprzewodowego połączenia między mikrokontrolerem a chmurą.

Na rysunku akcelerometr GY-61, czujnik wilgotności gleby YL-69 i moduł GSM SIM900A są połączone z płytką mikrokontrolera Arduino MEGA.



Ponieważ moduł GY-61 ma wbudowany konwerter 5V na 3,3V, pin VCC tego modułu jest podłączony do pinu wyjściowego 5V mikrokontrolera Arduino MEGA. Ponadto piny X, Y i Z GY-61 są podłączone odpowiednio do analogowych pinów wejściowych A1, A2 i A3 mikrokontrolera Arduino. Jak pokazano na rysunku 21.7, piny VCC, GND i SIG modułu YL-69 są podłączone odpowiednio do wyjścia 5 V, masy i analogowych pinów A5 mikrokontrolera Arduino. Moduł GSM SIM900A wykorzystuje swoje piny TTL do połączenia z mikrokontrolerem Arduino. Ponieważ moduł ten odpowiada za przesyłanie wartości czujników, jego piny nadajnika (SIM\_TXD) i odbiornika (SIM\_RXD) są połączone odpowiednio z pinami odbiornika (pin cyfrowy 0) i nadajnika (pin cyfrowy 1) mikrokontrolera Arduino. Na koniec, piny 5V i RST modułu GSM są połączone odpowiednio z wyjściem 5V i pinami RESET mikrokontrolera Arduino.

### Rejestrowanie danych i alerty

Jak już wspomniano, gdy mikrokontroler odbierze wartości z czujników, wartości te są przesyłane przez moduł GSM do bazy danych w chmurze. Skrypt PHP jest napisany w celu wykonania akcji zapisywania danych. Dane przechowywane w bazie danych są później wykorzystywane do analizy progów dla różnych czujników. Jeśli wartości czujników przekroczyły określone wcześniej progi, na zarejestrowane numery telefonów komórkowych wysyłane jest automatyczne powiadomienie SMS o osuwisku za pomocą bezpłatnej usługi o nazwie Twilio. Twilio to platforma komunikacji w chmurze, która używa numeru identyfikacyjnego konta i numeru telefonu komórkowego do wysyłania niestandardowego SMS-a na ten numer telefonu komórkowego.

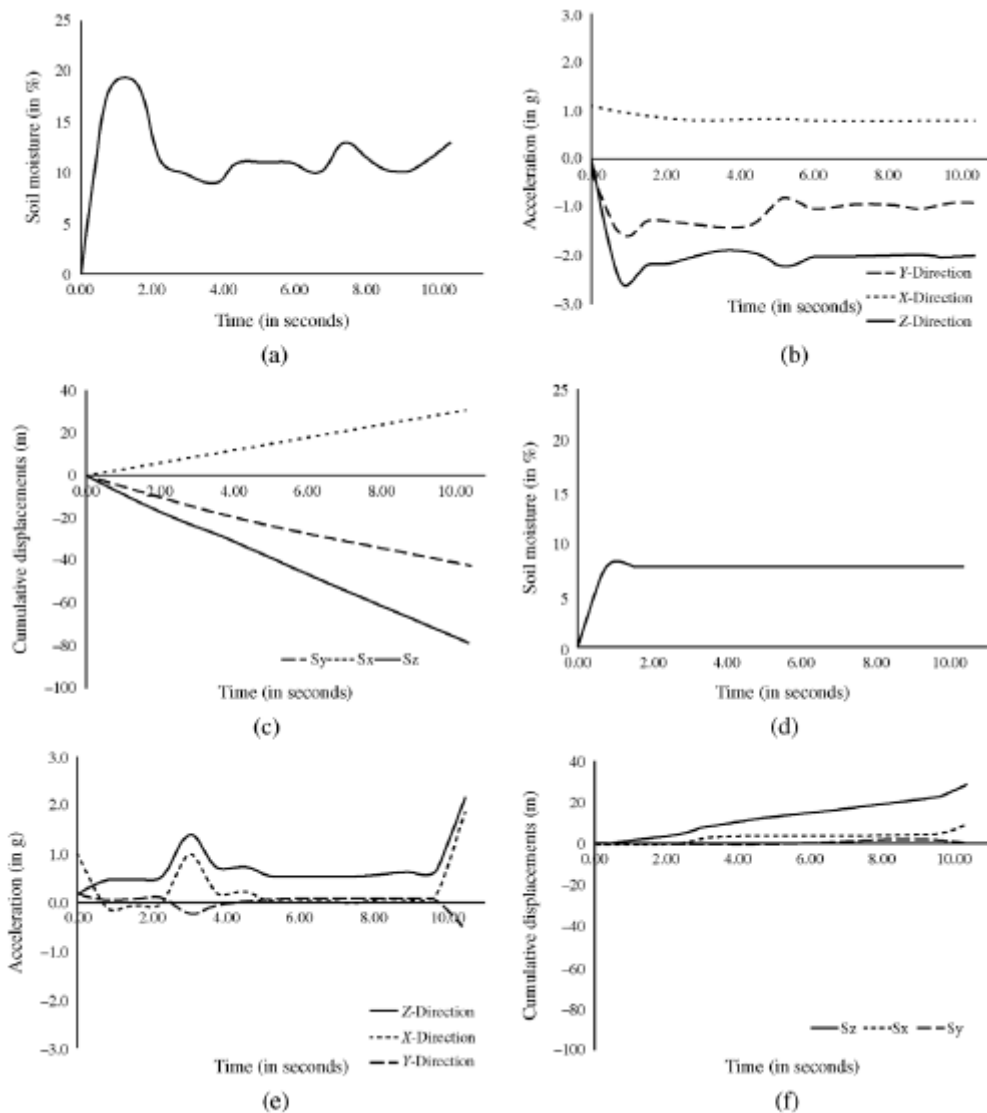
### Procedura eksperymentalna

Gleba była ubita w rampie, a rampa została podniesiona pod kątem nieco mniejszym niż kąt krytyczny gleby. Kątem krytycznym był kąt minimalny obliczony na podstawie właściwości gruntu, przy którym nastąpiłby ruch gruntu pod wpływem siły grawitacji bez dodatku wilgoci. Dla gleby użytej w doświadczeniu kąt krytyczny wynosił  $5^\circ$ . Następnie do gleby dodawano wilgoć, aż gleba się poruszyła i nastąpiło osunięcie się ziemi. Podczas eksperymentu surowe dane z czujników były przechowywane w bazie danych w chmurze. Następnie wartości czujników zostały przeanalizowane statystycznie, aby określić progi, przy których gleba uległa rozluźnieniu i nastąpiło osuwisko. Jeśli wartości czujników przekroczyły wcześniej ustalone progi, jednostka generująca alerty automatycznie wysyłała alerty SMS na zarejestrowane telefony komórkowe.

### Wyniki

W tej sekcji analizowane są w czasie wartości wilgotności gleby i ruchu gleby zarejestrowane przez różne czujniki. Rysunek a–c przedstawia wykres wartości wilgotności gleby, akcelerometru i

skumulowanego przemieszczenia, odpowiednio, z czujników umieszczonych na szczycie rury na końcu pochylni.



Jak widać na rysunku a, wartość czujnika wilgotności gleby wzrosła i osiągnęła wartość szczytową 18%, gdy na pochylni zaczęło się osuwanie (woda była wylewana na pochylnię w czasie  $t = 0$  s). Ponadto zmiany przyspieszeń w górnej części rury w ciągu pierwszych 2 s wlewania wody były następujące: 0,7 do -1g (kierunek X), 0,1 do -1,5g (kierunek Y) i 0,15 do -2,5g (kierunek Z). Te przyspieszenia i odpowiadające im przemieszczenia pokazały, że gleba w górnej części rury poruszała się w górę i na zewnątrz, gdy nastąpiło osuwisko. Ponadto w tym samym czasie wartości wilgotności gleby i wartości przyspieszenia osiągnęły swoje maksimum

## Wnioski

Zaproponowano niedrogie ramy IoT w skali laboratoryjnej do monitorowania osuwisk. W tym kontekście zastosowano czujniki oparte na MEMS do pomiaru wilgotności gleby i ruchu gleby na rampie. Wartości progowe czujników, uzyskane z eksperymentu, zostały porównane z danymi z czujników w czasie rzeczywistym, a powiadomienia SMS były wysyłane do zarejestrowanych telefonów komórkowych, gdy wartości czujników przekroczyły krytyczne poziomy progowe. Wyniki eksperymentalne wykazały, że podstawa rury doświadczyła ruchu przy zaledwie 8% akumulacji wilgoci

w porównaniu z górną częścią rury przy 18% akumulacji wilgoci. Jednym z prawdopodobnych powodów tej obserwacji jest to, że wiązanie gleby z glebą na szczycie rury było znacznie silniejsze w porównaniu z klejenie grunt-drewno u podstawy rury. Po drugie, stwierdzono, że czujnik wilgoci u podstawy rury wykazywał niewielkie zmiany wartości wilgotności w czasie. Wynik ten mógł być spowodowany wylewaniem się wody ze szczytu rampy. Tym samym nie gromadziła się ona tak bardzo u podstawy rury, jak w jej górnej części (górną część rury wchłonęła większość obecnej wilgoci). Chociaż w tym rozdziale opisano tylko jeden eksperyment obejmujący monitorowanie osuwisk w skali laboratoryjnej, wyniki pokazują potencjał wykorzystania czujników opartych na MEMS do monitorowania osuwisk w rzeczywistym świecie. Jednak przed rozwinięciem proponowanych ram monitorowania osuwisk w rzeczywistym świecie należy pokonać kilka wyzwań. Obejmuje to wiercenie na wzgórzu o stromych zboczach, wymagające samopodtrzymującego się źródła zasilania, całodobowe monitorowanie osuwisk, pakowanie czujników, aby mogły wytrzymać nierówny, pagórkowaty teren, oraz wykorzystanie innych przełomowych technologii IoT, które umożliwiają szybkie zbieranie danych. Wiercenie na stromych zboczach wymaga najnowocześniejszego sprzętu wiertniczego i interdyscyplinarnej wiedzy w obszarach cywilnych i geotechnicznych. W tym celu zachęca się do zaangażowania odpowiedniego sprzętu i interdyscyplinarnego zespołu badaczy. Do monitorowania osuwisk w rzeczywistym świecie potrzebne będzie samowystarczalne i stabilne źródło zasilania. Jednym ze sposobów zapewnienia takiego źródła zasilania jest wykorzystanie energii słonecznej. Jeśli jednak system monitoringu osuwisk pozostanie w stanie „włączonym” przez 24 godziny na dobę, to zapotrzebowanie mocy takiego systemu będzie bardzo duże. Ogólnie rzecz biorąc, zwiększyłoby to koszty monitorowania z powodu inwestycji w kilka paneli słonecznych i baterii. Jednym ze sposobów na utrzymanie niskich kosztów monitorowania jest skorzystanie z pasywnego systemu monitorowania, który śpi przez 10-15 minut, budzi się, aby zarejestrować wartości czujnika, a następnie śpi ponownie przez 10-15 minut. Jeśli deszcz pojawi się w czasie, gdy system jest w stanie uśpienia, deszcz wybudza system ze stanu uśpienia poprzez przerwanie sprzętowe. Jak wykazały eksperymenty, deszcz (lub woda) powodował wzrost wilgotności gleby w czasie. Jednak akumulacja wilgoci w glebie niekoniecznie musi wywołać osuwisko, gdzie wyzwalacz osuwiska jest również zależny od rodzaju gleby i jej właściwości. Chociaż w eksperymencie przetestowano tylko jeden rodzaj gleby.

Wspomniano powyżej, że zarówno właściwości gleby, jak i wilgotność gleby zostały uznane za czynniki przyczynowe w doświadczeniu. Metodologia eksperymentu może być łatwo dostosowana do monitorowania innych typów gleb.

Kolejne wyzwanie wiąże się z pakowaniem czujników opartych na MEMS, które są kluczowe, aby czujniki te nie uległy uszkodzeniu podczas użytkowania w świecie rzeczywistym. Jednym ze sposobów zapewnienia trwałości czujników jest zamontowanie ich na elastycznej gumowej lub plastikowej rurze podczas umieszczania ich na wzniesieniu. W rzeczywistości w opisywanym eksperymencie wykonano montaż tych czujników na elastycznej rurze. Proponowany framework IoT to całe, ekonomiczne rozwiązanie, które nie wymaga żadnego systemu komunikacji poza istniejącą telefonią 2G. Ramy te znajdują się jednak obecnie na poziomie prototypowym, na którym planuje się wdrożenie w przyszłości do monitorowania osuwisk na prawdziwym wzgórzu. Skalowanie systemu na wielu wzgórzach pozwoli na zbadanie innych przełomowych technologii IoT, takich jak szerokopasmowa łączność 5G (Osseiran i in., 2014). Technologie te będą miały przepustowość przekraczającą 100 megabitów na sekundę i umożliwią zbieranie ogromnych ilości wykrytych danych z setek czujników w czasie rzeczywistym. Podsumowując, ogólnie rzecz biorąc, proponowane ramy monitorowania osuwisk IoT pomagają obniżyć koszty monitorowania osuwisk w świecie rzeczywistym. W rzeczywistości, po przeskalowaniu do prawdziwego wzniesienia, oczekuje się, że ramy będą kosztować mniej niż 4% kosztów konwencjonalnych systemów, które są obecnie wykorzystywane do monitorowania osuwisk. Biorąc pod uwagę, że w samych Himalajach ginie 200 osób rocznie z powodu osuwisk, oczekuje się, że

opłacalność tego systemu IoT wyniesie tylko 1,3 USD na głowę. Oczekuje się, że ten niski koszt sprawi, że ramy staną się przystępnym cenowo systemem monitorowania osuwisk w przyszłości — systemem, który będzie można wdrożyć w kilku miejscach narażonych na osuwiska na całym świecie.