

System ostrzegania przed przymrozkami

Etap 1: Specyfikacja Techniczna

Michał Kołodziejczyk, Sebastian Chmielewski, Bartłomiej Gromulski

Opiekun projektu: dr inż. Wojciech Kazubski

15 lutego 2026

Spis treści

1	Rozpoznanie tematu	3
1.1	Typy przymrozków	3
1.2	Metody przeciwdziałania przymrozkom	3
1.3	Obecny schemat działania w celu ograniczenia skutków przymrozków	4
1.4	Nasza metoda przeciwdziałania przymrozkom	4
1.5	Dlaczego jabłonie?	4
1.6	Jaka powinna być ilość punktów pomiarowych?	5
1.7	Wpływ wiatru	5
1.8	Kluczowe wyzwania przy wykrywaniu przymrozków	6
1.9	Jak często wykonywać pomiary?	7
1.10	Założenia projektowe	7
1.11	Analiza obliczeń	7
1.12	Analiza potrzeb komunikacyjnych	8
2	Zdefiniowanie rozwiązania	9
2.1	Wybór architektury i stosu technologicznego	9
2.2	Podział oprogramowania na moduły	9
2.2.1	Oprogramowanie Węzła Pomiarowego (na RPi Zero)	9
2.2.2	Oprogramowanie Serwera Centralnego (na RPi 4)	9
2.3	Zaplanowanie procesu wdrożenia	10

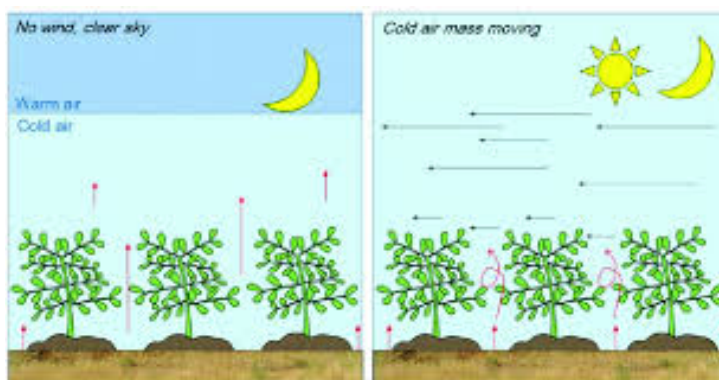
1 Rozpoznanie tematu

Nasz projekt obejmuje przewidywanie przymrozków w sadach. Zaczęliśmy od przeanalizowania tematu przymrozków i ustalenia w jaki sposób można je efektywnie przewidywać.

1.1 Typy przymrozków

- Przymrozek adwekcyjny: Powstaje na skutek napływu chłodnych mas powietrza (np. znad Arktyki). Może obejmować obszar nawet całego kraju. Przy tym typie przymrozku temperatura na różnej wysokości jest zbliżona - nie tworzą się warstwy zimnego powietrza przy powierzchni, co ułatwia wykrycie.
- Przymrozek radiacyjny: Powstaje wskutek ochłodzenia przygruntowej warstwy powietrza w wyniku wypromieniowania ciepła z podłoża do atmosfery. Jego występowaniu sprzyjają bezwietrzne i bezchmurne noce. Ten typ przymrozku wiąże się z tworzeniem warstw powietrza o różnych temperaturach. Często ma charakter lokalny
- Przymrozek adwekcyjno-radiacyjny: Jest on kombinacją obu typów przymrozku. Jego przewidywanie jest zazwyczaj trudniejsze.

Przeanalizowanie rodzajów przymrozków i ich przyczyn pozwala zauważyć, iż wykrywanie przymrozków powinno uwzględniać czynniki, które sprzyjają powstawaniu przymrozka radiacyjnego (takich jak rzeźba terenu), ponieważ ten typ przymrozku jest mniej przewidywalny.



Rysunek 1: Schemat przedstawiający przymrozek radiacyjny i adwekcyjny

1.2 Metody przeciwdziałania przymrozkom

- Zraszanie nadkoronowe: Uważane za jedną z najskuteczniejszych metod. Wykorzystuje zjawisko ciepła krzepnięcia – woda zamarzając na powierzchni rośliny, oddaje ciepło, co sprawia, że temperatura tkanek pod lodem utrzymuje się w okolicach 0°C, chroniąc je przed przemarzeniem. Metoda ta jest skuteczna zarówno przy przymrozkach radiacyjnych, jak i adwekcyjnych.
- Piecyki, lampy grzewcze, spalanie biomasy: Polega na bezpośrednim dostarczaniu ciepła w celu podniesienia temperatury powietrza wokół roślin. Jest to metoda generująca wysokie koszty. Najlepiej sprawdza się przy przymrozkach radiacyjnych, ponieważ silny wiatr znacząco obniżając efektywność ogrzewania.

- Wiatraki przeciwpzymrozkowe: Ich działanie opiera się na wykorzystaniu inwersji termicznej. Ściągają one cieplejsze warstwy powietrza znajdujące się wyżej i mieszają je z zimnym powietrzem zalegającym przy gruncie. Metoda ta jest skuteczna wyłącznie przy przymrozkach radiacyjnych. W przypadku przymrozków adwekcyjnego (napływowego) wiatraki są nieskuteczne, ponieważ napływająca masa powietrza jest zimna na każdej wysokości.

1.3 Obecny schemat działania w celu ograniczenia skutków przymrozków

1. Otrzymanie informacji o możliwych przymrozkach z ogólnokrajowej prognozy pogody.
2. Zastosowanie dostępnych środków ochrony na całym terenie.

Takie podejście ma kilka wad, m.in. jest ono związane z koniecznością działania również wtedy, gdy prognoza pogody się nie sprawdza, co oznacza dodatkowe koszty. Dodatkowo ogólnokrajowa prognoza jest oparta o dane o zbyt niskiej rozdzielczości, co oznacza możliwość wystąpienia nieprzewidzianych warunków, dotyczy to szczególnie przymrozków radiacyjnych.

1.4 Nasza metoda przeciwdziałania przymrozkom

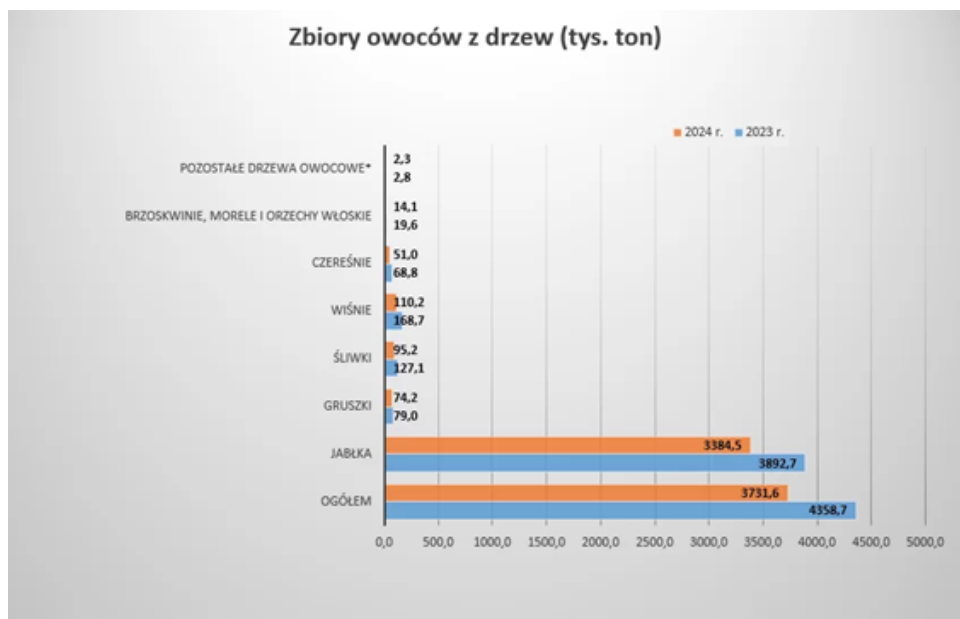
1. Otrzymanie komunikatu o możliwości wystąpienia przymrozków obejmujących część upraw.
2. Zastosowanie środków ochrony tam, gdzie to konieczne.
3. Zmniejszenie kosztów i zareagowanie na przymrozki spowodowane lokalnymi warunkami.

1.5 Dlaczego jabłonie?

W naszym projekcie skupiamy się na uprawach drzew owocowych. Z powodu różnej charakterystyki (odporność na zimno, wysokość) postanowiliśmy skupić się na jabłoniach. Wybór ten był podyktowany następującymi czynnikami:

- Powszechnością jabłoni w polskich sadach.
- Faktem, że jabłonie kwitną w okresie, gdy w Polsce często występują tzw. „zimni ogrodnicy”, co może zniszczyć nawet 100% plonów.

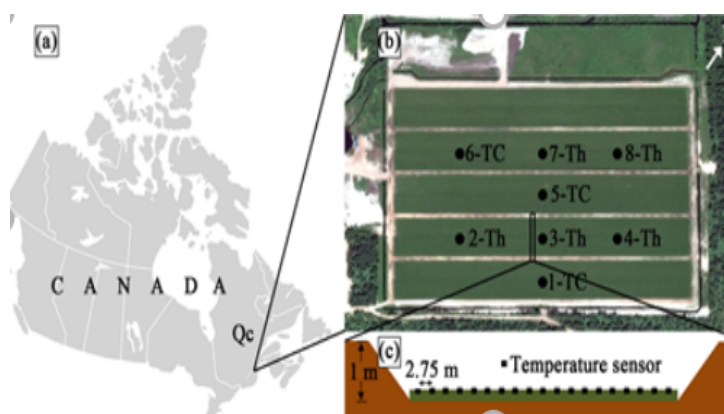
Wybór jabłoni oznacza, że narażone na przymrozki części rośliny będą znajdowały się na wysokości 0,7-1 m, co wpływa na rozmieszczenie czujnika temperatury. W fazie kwitnienia jabłoni nawet krótkotrwały (30-60 minut) spadek temperatury do -1°C lub -2°C powoduje nieodwracalne uszkodzenie pąków i utratę plonu.



Rysunek 2: Zbiory owoców w Polsce w latach 2023 i 2024

1.6 Jaka powinna być ilość punktów pomiarowych?

Badanie² pokazało wyraźną różnicę temperatur między punktami pomiarowymi numer 1 i 7, mimo że znajdowały się na tym samym obszarze. Punkt nr 1 osiągnął próg 2°C pół godziny wcześniej niż punkt nr 7. To pokazuje, że jeden czujnik na całe pole to zdecydowanie za mało, bo ukształtowanie terenu – wszelkie wały ziemne czy doły – powoduje, że temperatura rozkłada się nierównomiernie. Aby mieć pewność, że wszystkie rośliny przetrwają, sieć czujników musi być gęstsza, a dodatkowe stacje należy umieszczać zwłaszcza w większych zagłębieniach terenu, gdzie ryzyko przymrozku jest największe.



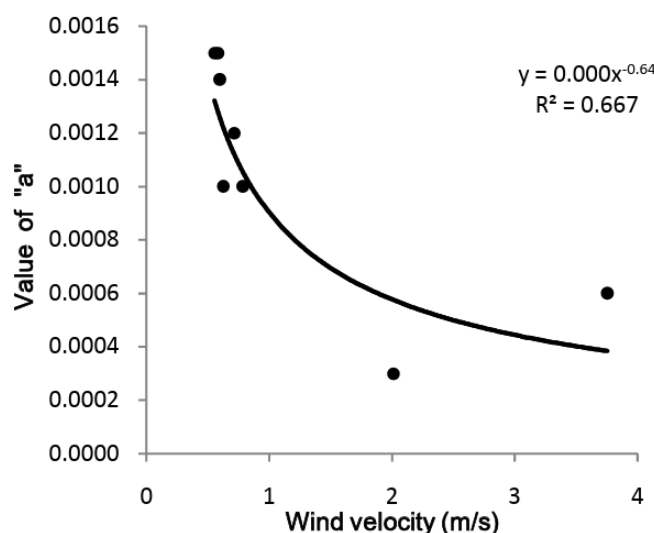
Rysunek 3: Punkt pomiarowy 1-TC osiągnął próg 2°C pół godziny wcześniej niż punkt pomiarowy położony zaledwie 200 metrów dalej (7-Th) (Źródło: Pelletier i in., 2017)

1.7 Wpływ wiatru

Na rysunku 4 przedstawiono zależność parametru a od prędkości wiatru². Parametr ten opisuje, jak bardzo zmienia się temperatura w miarę oddalania się od wału ziemnego na

brzegu pola. Wykres wyraźnie pokazuje, że przy słabym wietrze (poniżej 2 m/s) wartość a jest wysoka. Oznacza to, że w bezwietrzne noce ciepło oddawane przez wały znacznie podnosi temperaturę w ich pobliżu.

Dla rozmieszczenia czujników jest to kluczowa informacja. Jeśli umieścimy czujnik zbyt blisko, to w bezwietrzną noc pokaże on temperaturę wyższą niż ta, która panuje na środku pola. Przez to system może pokazywać, że jest cieplej niż w rzeczywistości i nie powiadomi na czas sadownika, co doprowadzi do przemarznięcia uprawy w centralnej części plantacji.



Rysunek 4: Wykres zależności parametru "a" od prędkości wiatru (Źródło: Pelletier i in., 2017)

1.8 Kluczowe wyzwania przy wykrywaniu przymrozków

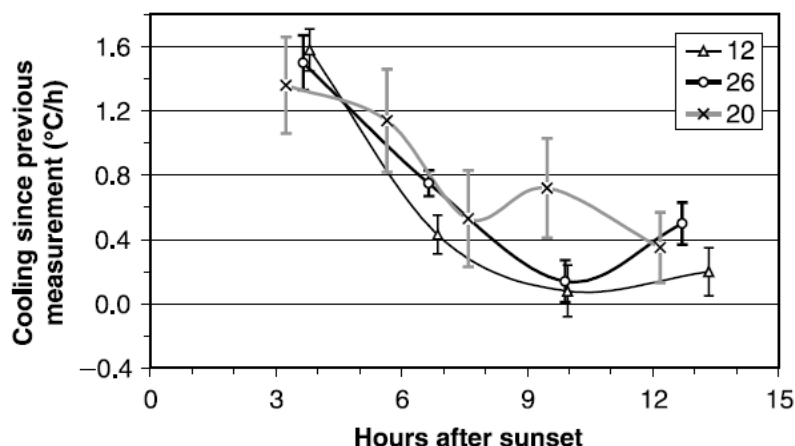
Przymrozki są w Polsce jednym z głównych czynników powodujących straty w rolnictwie. Stosowanie ogólnokrajowych prognoz do ochrony sadów w wielu przypadkach prowadzi do namiarowych kosztów albo strat plonów. Analiza dostępnych badań wskazuje, że głównymi problemami w skutecznym przewidywaniu przymrozków jest:

- Wysoka zmienność temperatury na małym obszarze: Na niewielkim obszarze różnice temperatur mogą sięgać $3\text{ }^{\circ}\text{C}^1$, a czas osiągnięcia progu krytycznego może różnić się nawet o 30 minut między poszczególnymi częściami pola². Wymusza to stosowanie gęstej sieci czujników.
- Inwersja termiczna: Podczas przymrozków radiacyjnych temperatura przy gruncie jest znacznie niższa niż kilka metrów wyżej. Różnice te mogą sięgać nawet $4.4\text{ }^{\circ}\text{C}^1$. Dlatego czujniki muszą być montowane na wysokości chronionych części rośliny.
- Wpływ wiatru: Brak wiatru (poniżej 2.3 m/s^1) sprzyja powstawaniu lokalnych zastoisk mrozowych i wymaga gęstej siatki pomiarowej. Silniejszy wiatr miesza powietrze, ujednolicając temperaturę na całym obszarze.

1.9 Jak często wykonywać pomiary?

Na rysunku 5 widać wyraźnie, że największe tempo ochładzania występuje w pierwszych godzinach po zachodzie słońca¹. W tym krytycznym czasie temperatura potrafi spadać bardzo gwałtownie – wykres pokazuje wartości rzędu 1,6°C na godzinę.

To kluczowa informacja dla konfiguracji sprzętu. Jeśli czujniki będą wybudzać się rzadko, na przykład co 30 minut, system nie zdąży zarejestrować tak szybkiej zmiany. Ostrzeżenie o przymrozkach może wtedy nadejść za późno, dlatego pomiary muszą być wykonywane znacznie częściej.



Rysunek 5: Średnie tempo spadku temperatury (°C/h) w kolejnych godzinach po zachodzie słońca (Źródło: Halley i in., 2003)

1.10 Założenia projektowe

W odpowiedzi na powyższe wyzwania, system zostanie oparty na następujących założeniach:

- **Architektura:** Rozproszona sieć węzłów pomiarowych (urządzeń końcowych), komunikujących się z centralnym serwerem za pośrednictwem bramy (gateway). Architektura opiera się na topologii gwiazdy, co jest sprawdzonym wzorcem w systemach IoT².
- **Komunikacja:** Wykorzystany zostanie stos komunikacyjny oparty na technologii **LoRaWAN** (dla komunikacji radiowej dalekiego zasięgu między węzłami a bramą) oraz protokole **MQTT** (dla przesyłania danych z bramy do serwera centralnego).
- **Obudowy:** Klasa szczelności IP54, zapewniająca ochronę przed pyłem i zachlapaniem.
- **Zasilanie:** Każdy węzeł będzie posiadał dostęp do stałego źródła zasilania.

1.11 Analiza obliczeń

Kluczowe analizy będą realizowane centralnie na serwerze, co ułatwia zarządzanie algorytmami.

- Punkt rosy: Obliczany na podstawie temperatury (T) i wilgotności względnej (RH) z wykorzystaniem formuły Magnusa¹:

$$T_d = \frac{b \cdot \gamma(T, RH)}{a - \gamma(T, RH)}, \quad \text{gdzie} \quad \gamma(T, RH) = \frac{a \cdot T}{b + T} + \ln\left(\frac{RH}{100}\right) \quad (1)$$

gdzie $a = 17.27$ i $b = 237.7$ to stałe dla temperatury wyrażonej w stopniach Celsjusza.

- Szybkość chłodzenia: Analiza trendu spadku temperatury do wczesnego ostrzegania, obliczana jako pochodna temperatury po czasie:

$$\frac{dT}{dt} \approx \frac{T_i - T_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad [^{\circ}\text{C/h}] \quad (2)$$

1.12 Analiza potrzeb komunikacyjnych

Wykorzystanie technologii LoRa w paśmie europejskim wiąże się z koniecznością dostosowania systemu do restrykcyjnych norm radiowych dla pasma ISM. Kluczowe parametry i ograniczenia to:

- Częstotliwość: 868 MHz.
- Szerokość pasma: typowo 125 kHz.
- Moc nadawania: maksymalnie 14 dBm (ok. 25 mW).
- Cykl pracy (Duty Cycle): 1%. Oznacza to, że urządzenie może nadawać sygnał jedynie przez 1% czasu (np. maksymalnie 36 sekund w ciągu godziny).

Ze względu na limit Duty Cycle oraz niską przepustowość łącza, ciągłe przesyłanie surowych danych pomiarowych jest niemożliwe. Dlatego zdecydowaliśmy, że węzeł będzie agregować dane lokalnie czyli zamiast wysyłać każdą próbkę, system wylicza średnią z pomiarów temperatury (np. z okresu 5 minut) i dopiero wynikowa wartość jest transmitowana do bramy. Pozwala to zachować zgodność z regulacjami oraz oszczędzać energię.

- Rozmiar i profil danych: Pojedynczy pakiet danych będzie zawierał identyfikator węzła, temperaturę oraz wilgotność. Przewidywany rozmiar ładunku (payload) to ok. 8-10 bajtów. Dane będą przesyłane cyklicznie, np. co 5 minut. Tak mała ilość danych i niska częstotliwość transmisji idealnie wpisują się w charakterystykę technologii LoRaWAN.
- Wybór protokołów: Protokół **MQTT** został wybrany jako warstwa aplikacyjna ze względu na jego architekturę publish-subscribe. Oddziela ona nadawców danych (bramę) od odbiorców (serwer analityczny), co znacząco zwiększa elastyczność i skalowalność systemu. Jego niska waga (lightweight) minimalizuje narzut komunikacyjny. LoRaWAN stanowi warstwę fizyczną i łącza danych, zapewniając komunikację radiową na dużym obszarze.
- Dopuszczalne opóźnienia: System ostrzegawczy wymaga relatywnie niskich opóźnień (poniżej jednej minuty od pomiaru do analizy). Zastosowany stos technologiczny (LoRaWAN + MQTT) bez problemu spełnia te wymagania.

2 Zdefiniowanie rozwiązania

2.1 Wybór architektury i stosu technologicznego

- Język programowania: Python 3. Wybór uzasadniony jest bogatym ekosystemem bibliotek do zastosowań naukowych i technicznych.
- Kluczowe biblioteki i narzędzia:
 - **Węzeł Pomiarowy:**
 - * `smbus2`: Do komunikacji I2C z czujnikiem BME280.
 - * `adafruit-circuitpython-rfm9x`: Biblioteka do obsługi modułu LoRa.
 - **Serwer Centralny:**
 - * Broker MQTT: Mosquitto. Sprawdzony i wydajny broker open-source.
 - * Baza Danych: InfluxDB. Wybrana ze względu na wysoką wydajność w przetwarzaniu danych szeregów czasowych⁴.
 - * Backend: Flask. Lekki framework webowy, idealny do tworzenia RESTful API.
 - * Obsługa MQTT: Paho-MQTT. Biblioteka kliencka dla języka Python do komunikacji z brokerem MQTT.
 - * Serwer WWW: Standardowy, wydajny stos do wdrażania aplikacji webowych w języku Python.
 - * Analiza i wizualizacja: NumPy, SciPy, Matplotlib itd.

2.2 Podział oprogramowania na moduły

2.2.1 Oprogramowanie Węzła Pomiarowego (na RPi Zero)

Węzeł pomiarowy składa się z komputera Raspberry Pi Zero, do którego podłączony jest moduł komunikacyjny LoRa (poprzez SPI) oraz czujnik BME280 (poprzez I2C). Oprogramowanie węzła będzie działało jako usługa systemowa (`systemd`), zapewniając automatyczny start i restart w razie awarii. Główna pętla programu:

1. Inicjalizacja: Konfiguracja interfejsów I2C, SPI oraz modułu LoRa.
2. Pętla główna:
 - (a) Odczyt danych z czujnika BME280.
 - (b) Pakowanie danych do formatu binarnego i obliczenie sumy kontrolnej.
 - (c) Wysłanie pakietu danych za pomocą LoRa do bramy sieciowej (gateway).
 - (d) Oczekiwanie przez zdefiniowany interwał.

2.2.2 Oprogramowanie Serwera Centralnego (na RPi 4)

- Broker MQTT (Mosquitto): Usługa działająca w tle, odpowiedzialna za przyjmowanie wiadomości od bramy i przekazywanie ich do subskrybentów.
- Serwis-Subskrybent (MQTT Subscriber): Proces napisany w Pythonie (`paho-mqtt`), który subskrybuje odpowiedni temat na brokerze. Po otrzymaniu wiadomości, waliduje ją, dekoduje i zapisuje dane do bazy InfluxDB.

- Backend Webowy (Aplikacja Flask): Udostępnia RESTful API do komunikacji z interfejsem użytkownika. Główne punkty końcowe dostarczają najnowsze i historyczne dane oraz dynamicznie generują obraz mapy ciepła.
- Logika analityczna i powiadomienia: Osobny moduł, który cyklicznie analizuje dane z bazy, sprawdza warunki alarmowe i w razie potrzeby wyzwala wysyłkę powiadomień.

W tej fazie projektu nie definiuje się szczegółów implementacji interfejsu użytkownika (strony WWW), która będzie przedmiotem dalszych prac.

2.3 Zaplanowanie procesu wdrożenia

Proces wdrożenia został podzielony na fazy, co stanowi standardową metodykę w projektach inżynierskich³.

1. **Faza 1: Prototypowanie i Testy Laboratoryjne.**
 - Zbudowanie jednego węzła, bramy i serwera w celu weryfikacji całego łańcucha komunikacyjnego (LoRa -> Brama -> MQTT -> Baza Danych).
2. **Faza 2: Rozwój Oprogramowania.**
 - Stworzenie finalnych wersji oprogramowania dla węzła, serwisu-subskrybenta i aplikacji serwerowej (API, logika analityczna).
3. **Faza 3: Wdrożenie Infrastruktury.**
 - Instalacja serwera centralnego, bramy LoRaWAN oraz przygotowanie i montaż fizyczny węzłów pomiarowych w sadzie.
4. **Faza 4: Uruchomienie i Kalibracja.**
 - Uruchomienie systemu, weryfikacja poprawności danych i wprowadzenie współrzędnych geograficznych każdego węzła.

Literatura

1. Halley, V., Eriksson, M., & Nunez, M. (2003). *Frost Prevention and Prediction of Temperatures and Cooling Rates using GIS*. Australian Geographical Studies, 41(3), 279-291.
2. Pelletier, V., Gumiere, S. J., Pepin, S., Gallichand, J. & Caron, J. (2017). Positioning Temperature Sensors for Frost Protection in Northern Cranberry Production. *Agricultural Sciences*, 8(9), 960–971.