



Ôn tập

# Những tiến bộ gần đây trong các giải pháp Internet vạn vật cho giai đoạn đầu Hệ thống cảnh báo: Đánh giá

Marco Esposito , Lorenzo Palma , Alberto Belli , Luisiana Sabbatini và Paola Pierleoni

Khoa Kỹ thuật Thông tin (DII), Đại học Politecnica delle Marche, 60131 Ancona, Ý; l.palma@univpm.it (LP); a.belli@univpm.it (AB); l.sabbatini@pm.univpm.it (LS); p.pierleoni@univpm.it (PP)  
\* Liên hệ: m.esposito@pm.univpm.it; Điện thoại: +39-0712204847

**Tóm tắt:** Thiên tai gây ra thiệt hại và tổn thất to lớn hàng năm, cả về kinh tế lẫn tính mạng con người. Việc phát triển các hệ thống dự báo thiên tai, tạo lập và phổ biến cảnh báo kịp thời là vô cùng cần thiết. Gần đây, các công nghệ như giải pháp Internet vạn vật (IoT) đã được tích hợp vào hệ thống cảnh báo để cung cấp một phương pháp hiệu quả nhằm thu thập dữ liệu môi trường và đưa ra cảnh báo. Bài viết này tổng quan các tài liệu liên quan đến các giải pháp Internet vạn vật (IoT) trong lĩnh vực Cảnh báo sớm cho các loại thiên tai khác nhau: lũ lụt, động đất, sóng thần và lở đất.

Mục tiêu của bài báo là mô tả các kiến trúc IoT đã áp dụng, xác định các ràng buộc và yêu cầu của một hệ thống Cảnh báo Sớm, và xác định một cách có hệ thống các giải pháp được sử dụng nhiều nhất trong bốn trường hợp sử dụng đã được xem xét. Bài tổng quan này cũng nêu bật những thiếu sót chính trong các tài liệu và đưa ra các đề xuất để đáp ứng các yêu cầu cho từng trường hợp sử dụng dựa trên các bài báo và giải pháp đã được xem xét, đặc biệt nhấn mạnh những lợi thế của việc tích hợp lớp Sương mù/Biến trong các kiến trúc IoT đã phát triển.

**Từ khóa:** Internet vạn vật; hệ thống cảnh báo sớm; cảnh báo sớm về lũ lụt; cảnh báo sớm về động đất; cảnh báo sớm về sóng thần; cảnh báo sớm về lở đất



Trích dẫn: Esposito, M.; Palma, L.; Belli, A.; Sabbatini, L.; Pierleoni, P.  
Những tiến bộ gần đây trong Internet

Giải pháp vạn vật cho hệ thống cảnh báo sớm:

Đánh giá. Cảm biến 2022, 22, 2124. <https://doi.org/10.3390/s22062124>

doi.org/10.3390/s22062124

Biên tập viên học thuật: Stefan Poslad, Stuart E. Middleton và Öcal

Necmio "giù"

Nhận: 28 tháng 1 năm 2022

Đã chấp nhận: 4 tháng 3 năm 2022

Ngày xuất bản: 9 tháng 3 năm 2022

Lưu ý của nhà xuất bản: MDPI giữ thái độ trung lập đối với các khiếu nại về quyền tài sản trong các bản đồ đã xuất bản và liên kết tổ chức các hiệp ước.



Bản quyền: © 2022 thuộc về tác giả.

Người được cấp phép MDPI, Basel, Thụy Sĩ.

Bài viết này là một bài viết truy cập mở được phân phối theo các điều khoản và các điều kiện của Creative Commons

Giấy phép ghi công (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Giới thiệu

Hệ thống cảnh báo sớm (EWS) là một kiến trúc tích hợp của các hoạt động, hệ thống và quy trình giám sát, dự báo và dự đoán mối nguy hiểm, đánh giá rủi ro thiên tai, truyền thông và chuẩn bị sẵn sàng cho phép các cá nhân, cộng đồng, chính phủ, doanh nghiệp và những bên khác thực hiện hành động kịp thời để giảm thiểu rủi ro thiên tai trước các sự kiện nguy hiểm [1]. EWS có các yếu tố chính sau: (i) kiến thức về rủi ro và đánh giá rủi ro, (ii) giám sát các thông số có thể tăng cường hoặc cho phép dự đoán và dự báo, (iii) phổ biến các cảnh báo kịp thời và (iv) chuẩn bị ứng phó với thảm họa [2,3]. Khung Sendai của Liên hợp quốc về giảm nhẹ thiên tai khuyến nghị tăng đáng kể tính khả dụng và khả năng tiếp cận các hệ thống cảnh báo sớm đa nguy cơ vào năm 2030 [4]. Năm 2020, chỉ có 23 trong số 195 quốc gia thành viên Liên hợp quốc có hệ thống EW quốc gia đa nguy cơ đang hoạt động. Tại các quốc gia này, 93,63% dân số tiếp xúc với rủi ro thiên tai đã được bảo vệ thành công thông qua việc sơ tán sau cảnh báo sớm [5], cho thấy hiệu quả to lớn của các hệ thống này. Tác động xã hội của hệ thống Cảnh báo Sớm quốc gia về mặt chuẩn bị và giảm thiểu rủi ro dự kiến sẽ cực kỳ quan trọng.

Một cuộc khảo sát tại California từ năm 2016 cho thấy 88% dân số đồng ý về tầm quan trọng của hệ thống Cảnh báo Sớm quốc gia về động đất [6], và một nghiên cứu khác cho thấy một hệ thống như vậy ở Bờ Tây Hoa Kỳ có thể giảm 50% nguy cơ thương tích bằng cách nâng cao sự chuẩn bị của người dân đối với sự kiện [7,8]. Về mặt chi phí-lợi ích, trong khi cần phải phân tích nghiêm ngặt cho từng trường hợp sử dụng và nó phụ thuộc rất nhiều vào tần suất của sự kiện và khả năng của hệ thống trong việc tránh báo động giả, việc sử dụng hệ thống EW có thể mang lại khả năng giảm thiểu thiệt hại đáng kể, đặc biệt là khi kết hợp với cơ sở hạ tầng hiệu quả và các biện pháp an toàn bổ sung. Do đó, EWS là những công cụ hữu ích để

bảo vệ sinh mạng con người, tài sản có giá trị và sự ổn định tài chính của các khu vực dễ xảy ra thiên tai [9]. Ví dụ, người ta ước tính rằng một hệ thống dự báo lũ lụt có thể giảm tới 35% thiệt hại hàng năm do lũ lụt [10]. Lợi ích từ việc giảm thiệt hại và tử vong nhờ hệ thống cảnh báo động đất có thể dễ dàng bù đắp cho 1 năm vận hành hệ thống nói trên [7] và tỷ lệ lợi ích trên chi phí ước tính của một EWS sóng thần ở Ấn Độ Dương sẽ là 4: 1 [11]. Hơn nữa, theo khuôn khổ Sendai, một khuôn khổ giảm thiểu rủi ro thiên tai hiệu quả đòi hỏi một cách tiếp cận đa mối nguy hiểm và đưa ra quyết định dựa trên thông tin rủi ro toàn diện dựa trên việc trao đổi và phổ biến dữ liệu phân tách một cách cởi mở. Việc sử dụng các công nghệ thông tin và truyền thông tiên tiến có thể cung cấp phương tiện để cung cấp các hệ thống cảnh báo đa mối nguy hiểm ở hầu hết các quốc gia vẫn chưa triển khai trên toàn quốc, nhờ chi phí triển khai thấp, đồng thời cung cấp phương tiện để phát sóng thông tin và cảnh báo thông minh và hiệu quả [12]. Đặc biệt, các công nghệ như Internet vạn vật, Điện toán đám mây và Trí tuệ nhân tạo có thể hỗ trợ các khía cạnh giám sát, dự báo và tạo báo động của Cảnh báo sớm (EW) bằng cách cung cấp các công cụ để cảm nhận, làm sạch, xử lý và phân tích dữ liệu đến từ môi trường.

Internet vạn vật (IoT) bao gồm các cơ sở hạ tầng kết nối các đối tượng được kết nối và cho phép quản lý, khai thác dữ liệu và truy cập dữ liệu mà chúng tạo ra [13]. Nó nhằm mục đích kết nối các đối tượng, bộ truyền động hoặc cảm biến để hoàn thành các nhiệm vụ khác nhau, chẳng hạn như giám sát môi trường cho các mục đích tùy chỉnh khác nhau [14]. Kiến trúc IoT cơ bản và chung bao gồm ba cấp độ: (i) môi trường cục bộ, chứa các đối tượng hoặc cảm biến thông minh giao tiếp với nhau và tương tác hoặc cảm nhận dữ liệu từ môi trường; (ii) lớp vận chuyển cho phép các nút cuối từ lớp đầu tiên giao tiếp với các lớp và cơ sở hạ tầng cao hơn; và (iii) lớp lưu trữ, khai thác dữ liệu và xử lý, thường được triển khai trên đám mây và có thể với các hệ thống và giao diện để cho phép người dùng truy cập và trực quan hóa dữ liệu. Trong khi Mạng cảm biến không dây (WSN) là một thành phần thiết yếu trong nhiều triển khai IoT (cung cấp giao diện giữa môi trường cục bộ và người dùng), các giải pháp IoT cho phép cùng tồn tại các thiết bị không đồng nhất, ứng dụng thời gian thực, dịch vụ phân tích dữ liệu và lưu trữ dữ liệu, bảo mật được cải thiện [15] và quản lý năng lượng [16], từ đó WSN có thể được hưởng lợi. Trong bối cảnh quản lý thảm họa và hệ thống cảnh báo sớm, IoT cung cấp phương tiện giám sát môi trường trên diện rộng từ nhiều nguồn dữ liệu khác nhau, truyền thông độ trễ thấp và xử lý dữ liệu thời gian thực, cho phép tạo ra các cảnh báo chính xác và kịp thời trong trường hợp xảy ra thảm họa hoặc dự báo.

Bài viết này trình bày tổng quan về kiến trúc và các yêu cầu của giải pháp IoT được sử dụng trong hệ thống EW. Cụ thể, bài viết sẽ giới thiệu kiến trúc IoT tổng quát và một số khái niệm, yêu cầu chung cho các hệ thống EWS dựa trên IoT, sau đó tập trung vào bốn loại thiên tai khác nhau: lũ lụt, động đất, sóng thần và lở đất. Đối với mỗi loại, bài viết sẽ trình bày một tập hợp các trường hợp sử dụng tập trung hoặc tối ưu hóa một số khía cạnh liên quan đến IoT (chẳng hạn như vùng phủ sóng vô tuyến, mức tiêu thụ năng lượng, khả năng chịu lỗi, độ trễ và xử lý dữ liệu thời gian thực) cần thiết cho hoạt động tối ưu của từng bối cảnh sử dụng EW cụ thể. Những đóng góp chính của bài báo đánh giá như sau: (i) bài báo mô tả kiến trúc chung cho hệ thống cảnh báo sớm dựa trên IoT; (ii) bài báo xác định một cách có hệ thống các giải pháp được sử dụng nhiều nhất trong bốn trường hợp sử dụng được kiểm tra và nêu bật các xu hướng và khoảng cách có thể có; và (iii) bài báo đưa ra các đề xuất cho nghiên cứu trong tương lai trong lĩnh vực này và một số khuyến nghị để có thể đáp ứng các yêu cầu chính của hệ thống như vậy, dựa trên các bài báo đã được đánh giá và kinh nghiệm của tác giả trong lĩnh vực này.

So với các bài đánh giá, khảo sát hoặc bài báo khác có tổng quan về tài liệu tập trung vào một loại thảm họa cụ thể hoặc một loại mối nguy hiểm duy nhất, chẳng hạn như [17-23], bài báo này xem xét nhiều thảm họa thiên nhiên, làm nổi bật sự khác biệt giữa các trường hợp, xét về kiến trúc IoT và các yêu cầu hệ thống, chẳng hạn như các ràng buộc về độ trễ cần thiết. Trong khi một số bài đánh giá, chẳng hạn như [20,21], tập trung rõ ràng hơn vào các thuật toán dự đoán, mô hình dự đoán Học máy và Thị giác Máy tính, hoặc quản lý hậu thảm họa, thì trọng tâm chính của công trình này là các giải pháp IoT đã được áp dụng và

khả năng tối ưu hóa của chúng, bao gồm các yêu cầu hệ thống, giao thức truyền thông, xử lý dữ liệu và các khía cạnh về cấu trúc mạng cảm biến.

Bài báo được cấu trúc như sau. Trong phần tiếp theo, chúng tôi giải thích phương pháp luận được sử dụng để biên soạn bài báo tổng quan và giới thiệu các Câu hỏi Nghiên cứu (RQ) được bài báo giải quyết. Trong Phần 3, kiến trúc IoT tổng quát được giới thiệu, cùng với một bộ các yêu cầu đối với một EWS. Các phần từ 4 đến 7 trả lời các RQ đã đề cập ở trên bằng cách phân tích các bài báo và các giải pháp cập nhật cho bốn thảm họa thiên nhiên đã được xem xét. Trong Phần 8, chúng tôi đưa ra một số khuyến nghị về nghiên cứu trong tương lai về chủ đề giải pháp IoT cho các hệ thống Cảnh báo Sớm. Cuối cùng, trong Phần 9, chúng tôi thảo luận về những phát hiện chính của bài báo.

## 2. Phương pháp luận

Dưới đây chúng tôi phân tích ngắn gọn các phương pháp được sử dụng để biên soạn bài đánh giá và Nghiên cứu Các câu hỏi (RQ) được đưa vào xem xét.

### 2.1. Phương pháp

Bài viết này đã tổng quan các bài báo liên quan đến các giải pháp IoT cho hệ thống EW, tập trung vào bốn loại thảm họa thiên nhiên khác nhau: lũ lụt, động đất, sóng thần và lở đất. Đối với mỗi trường hợp sử dụng này, một quy trình tìm kiếm các bài báo khoa học được thực hiện bằng bốn công cụ tìm kiếm khác nhau: Google Scholar, Elsevier, IEEE Xplore và MDPI. Các bài báo được thu thập trong mỗi quy trình tìm kiếm được lọc sơ bộ theo năm xuất bản để có thể bao quát khung thời gian từ năm 2017 đến năm 2022 và xem xét các bài báo và giải pháp gần đây hơn. Các bài báo tham khảo chính cũ hơn đã được trích dẫn khi cần thiết trong quá trình thảo luận về kiến trúc, giao thức hoặc phương pháp chung. Mỗi quy trình tìm kiếm cho một công cụ tìm kiếm đã chọn đều mang lại một số lượng lớn kết quả, do đó các từ khóa tìm kiếm hiệu quả đã được sử dụng. Trọng tâm chính của bài đánh giá là kiến trúc hệ thống EW và các khía cạnh liên quan đến IoT, vì vậy các bài báo chỉ đề xuất các thuật toán dự đoán, mô hình Học máy để dự báo thảm họa, hệ thống phục hồi sau thảm họa hoặc phổ biến cảnh báo đã không được đưa vào tài liệu được đánh giá, trừ khi chúng cũng cung cấp việc triển khai hoặc đề xuất kiến trúc IoT cho EW hoặc xử lý một số khía cạnh cụ thể của nó. Các bài báo được đánh giá bao gồm (i) các giải pháp IoT và WSN được đề xuất hoặc phát triển, (ii) các phương pháp và mô phỏng liên quan đến tối ưu hóa mạng cảm biến và đánh giá hiệu suất, và (iii) các cân nhắc về cấu trúc mạng hoặc các khía cạnh khác liên quan đến các ràng buộc và yêu cầu của EWS. Khi xem xét các khía cạnh này, các từ khóa tìm kiếm cụ thể đã được chọn cho từng quy trình tìm kiếm của bốn trường hợp sử dụng được kiểm tra trong phần đánh giá. Ví dụ, các từ khóa như "Hệ thống cảnh báo sớm", "IoT", "Mạng cảm biến không dây" và "Hệ thống cảnh báo" đã được sử dụng cho nghiên cứu cho từng trường hợp sử dụng, trong khi đối với một trường hợp sử dụng cụ thể như Cảnh báo sớm sóng thần, các từ khóa khác cũng được sử dụng, cụ thể là "Mạng cảm biến dưới nước", "IoOUT", "Giám sát đại dương" và "Giám sát sóng biển". Việc giảm thiểu hơn nữa đã đạt được bằng cách loại trừ các bài báo không trực tiếp đề cập đến các chủ đề liên quan đến IoT và bằng cách gạch chéo các từ khóa cụ thể. Quá trình lựa chọn các bài báo nghiên cứu kết thúc bằng việc đánh giá xem các bài báo đã chọn có thể trả lời một hoặc nhiều Câu hỏi nghiên cứu hay không. Ví dụ: quá trình tìm kiếm Cảnh báo sớm sóng thần trong công cụ tìm kiếm IEEE Xplore đã mang lại hơn 160 kết quả, sau đó được giảm xuống còn 52 sau khi lọc sơ bộ theo năm. Sau đó, bằng cách gạch chéo các từ khóa, tổng số bài báo được giảm xuống còn một số ít và cuối cùng chỉ có ba bài báo được chọn từ công cụ tìm kiếm này để đánh giá trường hợp sử dụng này.

### 2.2. Câu hỏi nghiên cứu

Bài báo này nhằm mục đích trả lời các Câu hỏi nghiên cứu sau:

- Câu hỏi 1: Những hạn chế và chiến lược chính khi phát triển EWS để quản lý và dự báo thảm họa là gì, đặc biệt là khi liên quan đến các khía cạnh liên quan đến IoT?
- Câu hỏi 2: Kiến trúc IoT và giao thức truyền thông nào được sử dụng nhiều nhất trong EWS?
- cho các loại thảm họa khác nhau?

- RQ3: Làm thế nào để cải thiện hoặc tối ưu hóa các hệ thống EW hiện có và những yếu tố chính là gì?  
những khoảng trống trong tài liệu và các trường hợp sử dụng đã được xem xét?

Các câu hỏi được lựa chọn với mục đích cung cấp cái nhìn tổng quan về kiến trúc và mạng trong lĩnh vực EWS, đồng thời đưa ra những hiểu biết sâu sắc hoặc giải pháp khả thi trong quá trình phát triển các hệ thống như vậy, bắt đầu từ các điều kiện tiên quyết và hạn chế cho đến kiến trúc tổng thể.

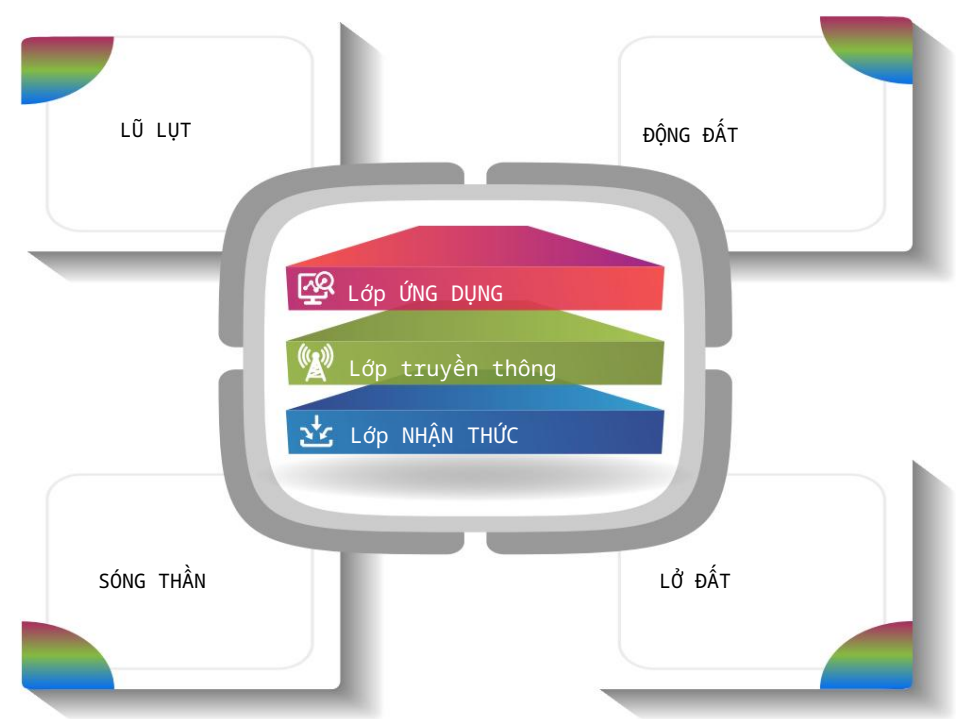
Mục tiêu của quá trình đánh giá là trả lời các câu hỏi đã được xác định trước đó. Với mỗi bài viết, chúng tôi nêu bật các mục tiêu chính và kết quả, nhằm mục đích chỉ ra cả những tiến bộ lẫn những điểm còn thiếu hoặc những cải tiến cần thiết trong các tài liệu gần đây (RQ3). Kiến trúc tham chiếu được sử dụng để phân tích các bài báo và để dàng suy rộng các công nghệ chính được sử dụng cho từng lớp kiến trúc được phát triển trong các giải pháp khác nhau (RQ2). Cuối cùng, chúng tôi đưa ra một số khuyến nghị chung để có thể đáp ứng các yêu cầu của một hệ thống EW, dựa trên tài liệu và các bài báo đã được đánh giá (RQ1).

3. Kiến trúc IoT cho Hệ thống EW

Trong phần tiếp theo, chúng tôi giới thiệu một kiến trúc IoT đơn giản có thể được sử dụng để mô tả các hệ thống EW dựa trên mô hình IoT. Bài viết sẽ xem xét kiến trúc tham chiếu này để mô tả tốt hơn các hệ thống IoT đã được xem xét trong các phần tiếp theo và tìm ra các xu hướng khả thi. Đối với mỗi trường hợp sử dụng được xem xét, chúng tôi sẽ tóm tắt các tính năng chính của từng bài báo được xem xét theo mẫu này, không chỉ để làm nổi bật các khía cạnh chính của từng giải pháp mà còn chỉ ra giải pháp nào đã áp dụng triển khai Edge và giải pháp nào thì không.

3.1. Kiến trúc Tham chiếu

Chức năng và đặc điểm của hệ thống IoT có thể được mô tả bắt đầu từ cấu hình kiến trúc của chúng. Đối với các giải pháp IoT cơ bản nhất [24], kiến trúc ba lớp có thể được sử dụng để mô tả một hệ thống EW chung dựa trên IoT. Như thể hiện trong Hình 1, kiến trúc IoT phổ biến về cơ bản bao gồm lớp Nhận thức, lớp Truyền thông và lớp Ứng dụng [23].



Hình 1. Kiến trúc IoT tham chiếu.

Trong khi các kiến trúc cụ thể có thể giới thiệu hoặc chỉ định các lớp mới và các lớp trung gian, chẳng hạn như Lớp Edge/Fog, Lớp Middleware và Lớp Interface, một kiến trúc chung và đơn giản có thể được coi là kiến trúc cảm nhận dữ liệu từ môi trường, xử lý và/hoặc chuyển tiếp dữ liệu đến một máy chủ trung tâm, sau đó máy chủ này sẽ sử dụng dữ liệu hiện tại và dữ liệu đã lưu trữ trước đó để tạo cảnh báo thông qua các phương pháp khác nhau, chẳng hạn như xử lý tín hiệu, phương pháp thống kê, thị giác máy tính hoặc Trí tuệ nhân tạo (AI), cụ thể là thông qua việc áp dụng các thuật toán Học máy (ML) và Học sâu. Dưới đây là mô tả ngắn gọn về từng lớp với các đặc điểm chính của chúng.

### 3.1.1. Lớp Nhận thức.

Lớp nhận thức có nhiệm vụ cảm nhận và thu thập dữ liệu từ môi trường, thường thông qua các cảm biến. Mạng cảm biến không dây được sử dụng rộng rãi trong các tình huống giám sát thiên tai: chúng bao gồm các nút được trang bị các đơn vị cảm biến và các đơn vị truyền thông có thể thu thập dữ liệu từ môi trường và sau đó chuyển tiếp đến một nút cổng giao tiếp và giao tiếp với các lớp cao hơn. WSN mang lại những lợi ích như khả năng mở rộng, cấu hình lại động, độ tin cậy, kích thước nhỏ, chi phí thấp và tiêu thụ năng lượng thấp [24]. Một số khía cạnh của sự phát triển WSN đặc biệt quan trọng trong việc giám sát thảm họa hoặc các tình huống EW thảm họa, chẳng hạn như tuổi thọ pin, phạm vi phủ sóng và khả năng chịu lỗi và chúng sẽ được giải thích chi tiết trong Phần 3.2.

Việc lựa chọn đúng đơn vị cảm biến có thể rất quan trọng trong việc cung cấp phản ứng kịp thời và chính xác, và các thông số khác nhau có thể đóng góp khác nhau vào một mối nguy hiểm môi trường cụ thể. Việc định vị các cảm biến ở một số khu vực hoặc địa hình nhất định có thể đặc biệt khó khăn và trong khi một số ứng dụng giám sát các sự kiện cục bộ (chẳng hạn như lở đất), những ứng dụng khác có thể yêu cầu triển khai trên các khu vực rộng lớn (chẳng hạn như lưu vực sông trong EW lũ lụt hoặc các khu vực địa lý rộng lớn có thể bị ảnh hưởng bởi động đất), và điều này sẽ làm tăng chi phí của giải pháp và yêu cầu các chiến lược đặc biệt để bao phủ hiệu quả toàn bộ khu vực cần giám sát, ví dụ như phân biệt giữa các nút có khả năng phủ sóng tầm xa và tầm ngắn [25] hoặc, ví dụ, với sự phân bổ thông minh và tối ưu của các cảm biến tùy thuộc vào xác suất xảy ra thảm họa [26].

### 3.1.2. Lớp truyền thông

Lớp truyền thông truyền dữ liệu được thu thập và xử lý bởi lớp nhận thức đến máy chủ, dịch vụ đám mây hoặc ứng dụng. Lớp này chịu trách nhiệm định tuyến, giao tiếp giữa các mạng không đồng nhất và truyền dữ liệu đáng tin cậy. Có nhiều công nghệ truyền thông khác nhau có thể được sử dụng để truyền dữ liệu, cả không dây và có dây.

Công nghệ truyền thông không dây trong các giải pháp IoT cho Hệ thống EW có thể được chia thành hai loại: công nghệ tầm xa và công nghệ tầm ngắn. Các công nghệ Mạng diện rộng công suất thấp (LPWAN) như Mạng diện rộng tầm xa (LoRaWAN), SigFox, Internet vạn vật băng hẹp (NB-IoT) và IoT GSM phủ sóng mở rộng (EC-GSM-IoT) cung cấp phạm vi xa và có thể được chia thành Có giấy phép và Không có giấy phép, tùy thuộc vào băng tần được sử dụng. LoRaWAN và SigFox sử dụng băng tần Công nghiệp, Khoa học và Y tế Không có giấy phép (ISM), trong khi NB-IoT và Hệ thống toàn cầu cho truyền thông di động (GSM) sử dụng mạng di động và hoạt động trong phổ được cấp phép. Mạng di động được triển khai rộng rãi và chúng cung cấp các dịch vụ đáng tin cậy và Chất lượng dịch vụ, nhưng mạng di động có thể bị ảnh hưởng nặng nề bởi các thảm họa môi trường [27,28], đây là một yêu cầu quan trọng đối với sự phát triển của Hệ thống EW. Trong số các công nghệ tầm ngắn, các giao thức không dây như Bluetooth năng lượng thấp (BLE) và Zigbee có thể cung cấp các giải pháp chi phí thấp với mức tiêu thụ điện năng rất thấp và hỗ trợ kiến trúc lưới [29]. Giới hạn chính của chúng là thiếu hỗ trợ cho truyền thông đường dài, trừ khi giải pháp sử dụng bộ lặp, điều này có thể làm tăng chi phí [30]. Các công nghệ truyền thông không dây phổ biến nhất cho các hệ thống EW là:

- Zigbee: Zigbee là một giao thức phổ biến, chi phí thấp, năng lượng thấp, tốc độ thấp

được xây dựng trên giao thức IEEE 802.15.4 hiện có và được phát triển bởi ZigBee Alliance.

Nó hoạt động trên tần số 2,4 GHz

Băng tần rộng và tốc độ dữ liệu từ 20 đến 250 kbps. Zigbee hỗ trợ các cấu trúc hình sao, lưới và cây cụm, trong đó kết nối lưới linh hoạt và đáng tin cậy hơn [31], cho phép WSN tồn tại trong trường hợp lỗi nút và mất nút. Nó có khối lượng nhẹ hơn so với Wi-Fi và Bluetooth và tuổi thọ pin lên đến 5 năm, nhưng phạm vi tương đối ngắn và tốc độ dữ liệu thấp.

- Bluetooth và BLE: Bluetooth dựa trên tiêu chuẩn IEEE 802.15.1.

Phiên bản tiết kiệm năng lượng, giá rẻ của chuẩn này là Bluetooth Low Energy. Cả Bluetooth và BLE đều hoạt động trong băng tần ISM 2,4 GHz. Chúng có tốc độ dữ liệu lên đến 1 Mbps và sử dụng phân mảnh để truyền các gói dữ liệu dài hơn [27]. Trong BLE, có sự đánh đổi giữa mức tiêu thụ năng lượng, độ trễ, kích thước piconet và thông lượng, nhưng việc điều chỉnh các tham số cho phép tối ưu hóa BLE cho các ứng dụng IoT khác nhau [32].

- 6LoWPAN: IPv6 qua Mạng cá nhân không dây công suất thấp (6LoWPAN) là một chuẩn do Lực lượng đặc nhiệm kỹ thuật Internet định nghĩa để gửi các gói IPv6 qua IEEE 802.15.4 hoặc hiện tại cũng qua các giao thức khác như Bluetooth/BLE. Chuẩn này được sử dụng rộng rãi cho các cảm biến cần truyền lượng dữ liệu thấp và hoạt động trên các băng tần không được cấp phép. Nhóm 6LoWPAN đã định nghĩa các cơ chế đóng gói và nén cho phép các gói IPv6 được truyền qua mạng không dây để cho phép các mạng cảm biến sử dụng IP thay vì các công nghệ độc quyền khác.

- Wi-Fi: Wi-Fi là một nhóm công nghệ không dây phổ biến rộng rãi theo chuẩn 802.11. Mặc dù nhanh hơn các chuẩn IoT khác như Bluetooth, các thiết bị Wi-Fi lại tiêu thụ nhiều điện năng hơn các thiết bị khác, chẳng hạn như các thiết bị dựa trên BLE. Wi-Fi HaLow (802.11.ah) là một công nghệ Wi-Fi mới hoạt động trong phổ tần dưới 1 GHz và được thiết kế riêng cho các trường hợp sử dụng IoT bằng cách bổ sung mức tiêu thụ điện năng thấp và phạm vi phủ sóng xa, phù hợp cho các ứng dụng này.
- LoRaWAN: LoRa là công nghệ lớp vật lý sử dụng kỹ thuật trải phổ độc quyền và giao thức Kiểm soát Truy cập Trung bình LoRaWAN

là một giao thức nguồn mở được Liên minh LoRa chuẩn hóa và chạy trên lớp vật lý LoRa.

Nó hoạt động trong các băng tần ISM, tức là 868 MHz ở Châu Âu, 915 MHz ở Bắc Mỹ và 433 MHz ở Châu Á. Điều chế LoRa cho phép hiệu suất cao chống nhiễu và tốc độ dữ liệu khác nhau, từ 300 bps đến 50 kbps. LoRaWAN cải thiện tỷ lệ tin nhắn nhận được bằng cách truyền lại, cung cấp phạm vi phủ sóng rộng (10–40 km ở vùng nông thôn và 1–5 km ở vùng thành thị [33]), chi phí thấp và thời lượng pin dài cho các thiết bị đầu cuối. Nó cung cấp ba loại thiết bị đầu cuối cho các yêu cầu IoT khác nhau, chẳng hạn như độ trễ hoặc mức tiêu thụ năng lượng.

- EC-GSM-IoT: EC-GSM-IoT tái sử dụng các sóng mang băng hẹp 200 kHz từ mạng GSM và chỉ cần cập nhật phần mềm mạng GSM mà không cần thêm phần cứng. Một số giải pháp trong tài liệu được đánh giá vẫn sử dụng các mô-đun GSM và Dịch vụ Vô tuyến Gói Chung (GPRS) để kết nối, nhưng GSM Phủ sóng Mở rộng hướng đến hiệu suất tốt hơn, bao gồm vùng phủ sóng trong nhà tốt hơn, triển khai quy mô lớn, giảm độ phức tạp và tiêu thụ điện năng tốt hơn so với các mô-đun và thiết bị GSM cũ [34].

- NB-IoT: NB-IoT là công nghệ được giới thiệu bởi Dự án Đối tác Thế hệ thứ 3, hoạt động trong phổ tần được cấp phép và tái sử dụng cơ sở hạ tầng Tiến hóa Dài hạn hiện có. NB-IoT cung cấp vùng phủ sóng cao (mạnh hơn 20 dB so với GSM truyền thống) với Mật độ ghép nối tối đa cao là 164 dB [34], cho phép các thiết bị NB-IoT tiếp cận các vị trí ngầm (ví dụ: để định vị nạn nhân [28]). Nó có mức tiêu thụ năng lượng thấp và cải thiện các cơ chế tiết kiệm năng lượng; các quy trình mạng, ngăn xếp giao thức, sơ đồ điều chế và độ phức tạp của băng tần cơ sở được đơn giản hóa để giảm độ phức tạp và chi phí của Thiết bị Người dùng. Các loại độ trễ khác nhau có thể xảy ra trong quá trình truyền thông NB-IoT và độ trễ phải được giữ dưới 10 giây

trong các ứng dụng thời gian thực [30].

- 5G: Mạng 5G sẽ cung cấp thêm các giải pháp và tài nguyên khi nói đến truyền thông di động/di động. Đặc biệt, Truyền thông Độ trễ Thấp và Siêu tin cậy (URLLC) nhằm mục đích cung cấp độ trễ dưới 1 ms và với độ tin

khiến nó đặc biệt phù hợp cho các trường hợp sử dụng như Cảnh báo sớm về động đất, được đặc trưng mạnh mẽ bởi hạn chế về độ trễ [35]. •

EnOcean: EnOcean hoạt động trong các băng tần không được cấp phép, tần số 868 MHz ở Châu Âu và tần số 315 MHz ở Châu Mỹ. EnOcean không có khả năng xử lý các cấu trúc mạng ad hoc như các giao thức truyền thông không dây khác và nó có ít tính năng hơn các giao thức khác, nhưng trọng tâm chính của nó là tiết kiệm năng lượng [36], do đó phù hợp cho việc quản lý thảm họa, đặc biệt là nhờ tính năng thu thập năng lượng của nó [27].

- Truyền thông vệ tinh: Việc sử dụng truyền thông vệ tinh có thể tỏ ra hiệu quả khi truyền thông mặt đất bị gián đoạn hoặc khi triển khai IoT ở những khu vực địa lý khó tiếp cận bằng các phương tiện khác như truyền thông di động, chẳng hạn như do thiếu cơ sở hạ tầng hiện có. Hiện có một số nhà cung cấp dịch vụ hỗ trợ IoT vệ tinh, và vệ tinh cũng được kỳ vọng sẽ đóng một vai trò quan trọng trong việc hỗ trợ các hệ thống 5G và IoT [37].

Công nghệ có dây cũng có thể được sử dụng trong các hệ thống WSN và IoT. Ví dụ, các giao thức IoT công nghiệp như CANOpen cũng đã được sử dụng trong các tài liệu được đánh giá để kết nối các thiết bị và cảm biến đã được sử dụng trong các hệ thống EW đã phát triển. Tương tự, các hệ thống có dây khác như truyền thông cáp quang vẫn có thể chứng minh hiệu quả trong giao tiếp, ví dụ như trong môi trường dưới nước. Trong bối cảnh này, các giao thức vô tuyến không dây đã đề cập ở trên thường không phải là lựa chọn phù hợp cho truyền thông do các kịch bản truyền dẫn khác nhau, và thay vào đó, Mạng cảm biến không dây dưới nước (UWSN) thường sử dụng truyền thông âm thanh.

Thông thường, truyền thông không dây đã được chứng minh là hiệu quả nhất trong các sự kiện thảm họa và trường hợp khẩn cấp [38], mặc dù cả truyền thông có dây và không dây đều dễ bị lỗi. Thảm họa có thể gây ra tác động lớn đến cơ sở hạ tầng và mạng lưới, ví dụ như cắt đứt khu vực bị ảnh hưởng trong trường hợp ăng-ten, đường truyền cáp quang hoặc cáp treo bị hỏng [27]; do đó, cần xem xét các kênh truyền thông dự phòng để đảm bảo các đường truyền thông hoạt động luôn khả dụng.

### 3.1.3. Lớp Ứng dụng

Lớp ứng dụng nằm ở tầng trên cùng của kiến trúc phân tầng IoT. Nó sử dụng dữ liệu nhận được từ lớp truyền thông để cung cấp các dịch vụ hoặc hoạt động [24], có thể kết hợp dữ liệu thu thập được với dữ liệu lịch sử và dữ liệu dự báo vệ tinh hoặc thời tiết từ các nguồn khác. Lớp ứng dụng triển khai các thuật toán để tạo và lan truyền cảnh báo nếu một sự kiện thảm khốc sắp xảy ra; nó có thể cung cấp cơ sở dữ liệu để lưu trữ dữ liệu cũ và dữ liệu hiện tại theo thời gian thực; nó có thể đưa ra dự đoán và dự báo, v.v. Giao diện người dùng có thể được tạo trên lớp ứng dụng và, trong các kiến trúc hướng dịch vụ, các lớp quản lý dịch vụ và lớp trung gian có thể được xen kẽ giữa Lớp Ứng dụng và Lớp Truyền thông để hoạt động như một cầu nối giữa các thiết bị và ứng dụng, và để đảm bảo khả năng tương tác [39]. Các nền tảng IoT dựa trên đám mây cung cấp khả năng lưu trữ và tính toán gần như vô hạn. Có nhiều nền tảng đám mây hiện có cung cấp các dịch vụ khác nhau hữu ích cho các giải pháp IoT [40]. Phân tích dữ liệu là một phần thiết yếu của các hệ thống IoT EW, có thể phải xử lý một lượng lớn dữ liệu từ các nguồn, vị trí địa lý và thời điểm khác nhau cần được xử lý và phân tích. Phân tích dữ liệu có thể trở thành nút thắt cổ chai của hệ thống EW [27], do đó, các nền tảng đám mây nên được liên kết với các hệ thống EW hiện đại [19]. Điện toán đám mây cũng đi kèm với các vấn đề như độ trễ khi lượng dữ liệu cần xử lý quá lớn, nhưng điện toán Sương mù/Biên có thể giảm tải cho lớp ứng dụng. Khi xử lý một lượng lớn thiết bị, cảm biến và nguồn dữ liệu không đồng nhất, như trong EWS, phương pháp tiếp cận ngữ nghĩa cũng có thể được sử dụng để tăng cường truy vấn và xử lý dữ liệu.

Điện toán sương mù, hay nói rộng hơn là điện toán biên, có thể được triển khai giữa lớp Truyền thông và lớp Ứng dụng để cung cấp phản hồi nhanh hơn và chất lượng tốt hơn so với các giải pháp chỉ dựa trên điện toán đám mây [24]. Mặc dù các dịch vụ đám mây cung cấp khả năng lưu trữ và xử lý thiết yếu, việc truyền tải lượng lớn dữ liệu từ nhiều cảm biến hoặc nguồn dữ liệu có thể tốn kém, và việc xử lý nhiều dữ liệu thô trên các máy chủ chuyên dụng sẽ làm tăng thêm



độ trễ có thể ảnh hưởng đến hiệu suất của hệ thống EW. Trong điện toán sương mù và điện toán biên, dữ liệu từ lớp nhận thức trước tiên được xử lý ở biên mạng (trên các cổng hoặc thậm chí các thiết bị đầu cuối) trước khi truyền đến các lớp cao hơn, ví dụ như đến dịch vụ đám mây, do đó độ trễ và lượng dữ liệu gửi đến đám mây có thể được giảm bớt. Điều này cũng có thể giúp khắc phục tình trạng mất ổn định băng thông [19] (vì xử lý dữ liệu ở biên có thể làm giảm mức tiêu thụ băng thông [39]) và tình trạng mạng không liên tục khi xảy ra các mối nguy hiểm về môi trường hoặc trong giai đoạn ứng phó thảm họa [41]. Hơn nữa, Điện toán biên cũng phù hợp với các thiết bị có thời lượng pin hạn chế [42]. Các nút sương mù cũng có thể triển khai các thuật toán để đưa ra dự đoán dựa trên dữ liệu thu thập được từ lớp nhận thức [26].

Người ta cũng có thể nhúng các mô hình ML vào các thiết bị Edge, nhưng tính phức tạp và hạn chế về bộ nhớ có thể khiến việc này trở nên khó khăn hơn [39].

### 3.2. Yêu cầu của Hệ thống EW

Tất cả các giải pháp IoT đều có một số hạn chế cần được lưu ý khi triển khai hệ thống IoT. Hệ thống Cảnh báo Sớm cần đưa ra cảnh báo kịp thời bằng cách sử dụng dữ liệu thường được thu thập từ WSN, điều này cũng đi kèm với các yêu cầu riêng như mức tiêu thụ điện năng hạn chế và truyền thông công suất thấp, độ tin cậy đầu cuối cao hoặc toàn diện, và độ trễ hạn chế. Việc truyền và xử lý dữ liệu ở các lớp cao hơn cũng cần được tối ưu hóa để không làm tăng độ trễ cho hệ thống. Do đó, các yêu cầu sau có thể được xác định khi thiết kế giải pháp IoT cho hệ thống EW:

- Tuổi thọ pin: WSN triển khai các cảm biến cần phải hoạt động trong thời gian dài, đặc biệt là khi chúng được lắp đặt ở những vị trí khó tiếp cận hoặc địa hình hiểm trở khiến việc thay pin trở nên tốn kém. Cần đánh giá ngân sách năng lượng cho từng ứng dụng và tối ưu hóa việc thu thập và truyền dữ liệu để hạn chế mức tiêu thụ điện năng trong các điều kiện làm việc quan trọng như hoạt động vào ban đêm (khi pin mặt trời không được sạc lại) đối với các cảm biến được trang bị bộ phận quang điện hoặc các tình huống môi trường quan trọng cần nhiều phép đo hơn, v.v. Một chiến lược tiết kiệm năng lượng phổ biến là để các nút chuyển sang chế độ ngủ khi chúng không được sử dụng; tuy nhiên, các giao thức truyền thông cho WSN phải tiết kiệm năng lượng, giảm thiểu chi phí chung và truyền lại [43].
- Khả năng chịu lỗi và độ tin cậy: Hệ thống phải có khả năng hoạt động ngay cả khi một hoặc nhiều nút không còn khả dụng hoặc nếu cấu trúc mạng thay đổi. Nhiều yếu tố có thể xác định tình huống lỗi, chẳng hạn như pin yếu, vùng phủ sóng kém, nút bị hư hỏng hoặc bị phá hủy, v.v. Vì tính di động của các nút hoặc cổng làm thay đổi trạng thái của mạng và làm phức tạp việc định tuyến tin nhắn, nên có thể sử dụng nhiều giao thức định tuyến WSN chuyên dụng để tính đến các yếu tố này [43]. Các giao thức hỗ trợ cấu trúc mạng lưới (Zigbee, Bluetooth) rất hữu ích vì chúng cung cấp tính linh hoạt cho mạng trong trường hợp một hoặc nhiều nút bị lỗi. Do đó, các thuật toán tự tổ chức lại và dự đoán lỗi là điều cần thiết để cho phép hệ thống EW tiếp tục đưa ra cảnh báo [44]. Hơn nữa, vỏ bọc hoặc chế tạo của nút cảm biến phải được thực hiện sao cho điều kiện thời tiết xấu, lũ lụt hoặc bão ít ảnh hưởng đến nó hơn [27].
- Phạm vi phủ sóng: Các khu vực địa lý cần được giải pháp IoT bao phủ cho hệ thống EW có thể rất rộng lớn, do đó, các giao thức truyền thông được chọn phải có khả năng cho phép truyền thông tầm xa giữa các nút và cổng ở xa với tốc độ, độ trễ, mất gói tin và các thông số khác được xác định trước. Một số vị trí cũng có thể bị tắc nghẽn, che khuất nặng hoặc các vấn đề khác có thể làm ảnh hưởng đến truyền thông vô tuyến, do đó, việc đánh giá ngân sách liên kết là cần thiết để hiểu liệu các liên kết truyền thông có hoạt động với các thông số cần thiết hay không.
- Độ trễ: Hệ thống EW cần cung cấp cảnh báo kịp thời, do đó hệ thống cần có khả năng truyền dữ liệu nhanh chóng và việc xử lý không mất thời gian. Điện toán sương mù/biên giúp giảm lượng dữ liệu được gửi đến các lớp cao hơn, giảm độ trễ phát sinh khi làm sạch, phân tích và xử lý lượng lớn dữ liệu ở lớp ứng dụng. Việc lựa chọn thuật toán xử lý phù hợp cũng có thể có giá trị để giảm độ trễ. Tùy thuộc vào ứng dụng, các ràng buộc thời gian khác nhau có thể được



bắt buộc và các giao thức truyền thông khác nhau phù hợp với EW có thể cung cấp thời gian truyền ngắn, từ vài giây đến vài mili giây.

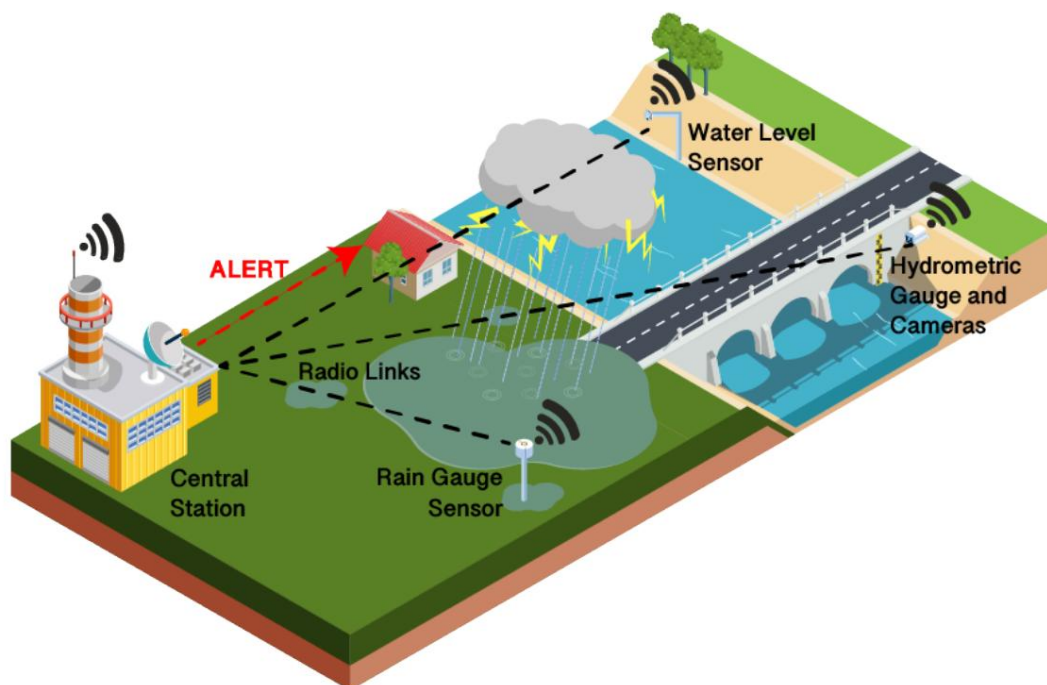
Dựa trên kiến trúc IoT chung đã được xác định và các yêu cầu chung đối với hệ thống IoT, các phần sau đây sẽ trình bày các đặc điểm riêng và giải pháp cho từng trường hợp sử dụng trong bốn trường hợp được xác định là có liên quan đến ứng dụng Hệ thống EW.

#### 4. Lũ lụt

Lũ lụt là một trong những thảm họa môi trường nguy hiểm nhất, hàng năm gây ra những thiệt hại to lớn về người và cơ sở hạ tầng. Lũ quét là mối quan tâm đặc biệt vì chúng xảy ra nhanh chóng, dữ dội và không có cảnh báo trước, do đó đòi hỏi các hệ thống cho phép dự đoán và có thời gian để sơ tán và thực hiện các biện pháp an toàn khác.

Các sự kiện có thể gây ra lũ lụt là mưa lớn, giông bão và tuyết tan nhanh.

Sự bất ổn về thủy văn địa chất và tính chất đất cũng cần được tính đến khi đánh giá rủi ro lũ lụt. Một số hệ thống EW lũ lụt hiện có và đang hoạt động, chẳng hạn như Hệ thống Nhận thức Lũ lụt Châu Âu, sử dụng phát hiện lượng mưa (ví dụ, từ radar) hoặc dự báo mưa để tạo cảnh báo khi lượng mưa được phát hiện vượt quá một ngưỡng nhất định [45]. Hệ thống IoT tạo ra dữ liệu có thể truy cập ngay lập tức cho các ứng dụng cảnh báo thời gian thực. Các phương pháp dự đoán trong EW Hệ thống IoT có thể dựa vào các mô hình thủy văn địa chất hoặc các mô hình thống kê và học máy thu thập dữ liệu theo thời gian thực từ WSN, gửi chúng đến máy chủ từ xa để xử lý và sau đó hiển thị kết quả hoặc tạo cảnh báo. Hình 2 minh họa cách triển khai chung của hệ thống cảnh báo lũ sớm dựa trên IoT, sử dụng nhiều loại cảm biến khác nhau.



Hình 2. Ví dụ về việc triển khai Hệ thống cảnh báo sớm lũ lụt dựa trên IoT.

##### 4.1. Các trường hợp sử dụng được đánh giá

cho Hệ thống cảnh báo sớm lũ lụt Bảng 1 tóm tắt các bài viết được đánh giá trong bối cảnh hệ thống cảnh báo sớm lũ lụt và phân tích khách quan về các bài viết này được minh họa bên dưới.

Bảng 1. Các bài viết được đánh giá trong Flood EW.

Bài báo	Trọng tâm và mục tiêu Bài	Kết quả
[46]	báo đề xuất một hệ thống IoT đơn giản để cảnh báo lũ lụt tại các đập, cố gắng khắc phục một số vấn đề trong các giải pháp trước đây như nhu cầu xử lý dữ liệu không đồng nhất, mức tiêu thụ điện năng và tình trạng mất vùng phủ sóng di động đột ngột.	Một ứng dụng di động sẽ được triển khai để cảnh báo người dùng, dựa trên công nghệ Zigbee. Ứng dụng này sẽ cung cấp khả năng phục hồi sau sự cố mạng di động, nhưng yêu cầu người dùng phải sử dụng phần cứng Zigbee.
[26]	Triển khai Lớp sương mù trong Flood EW để giảm độ trễ và cung cấp dự đoán trước Lớp phân tích dữ liệu, đồng thời tối ưu hóa năng lượng và chi phí thông qua việc chia khu vực được giám sát theo hình lục giác. Đề xuất và xác thực các thuật toán dự đoán.	Một nguyên mẫu đã được đề xuất để thử nghiệm tất cả các lớp cùng lúc, cho thấy hiệu quả của kiến trúc được đề xuất. Các thuật toán đã được thử nghiệm với dữ liệu địa lý được thu thập từ các trang web theo dõi lũ lụt.
[47]	Sử dụng các cảm biến khác nhau được kết nối bằng mô-đun 3G/2G/GSM và mô-đun LoRa, tận dụng vùng phủ sóng mạng tốt trong khu vực để xử lý, biên soạn và chuyển tiếp thông tin nhằm đưa ra cảnh báo kịp thời.	Chi phí của giải pháp này khá cao, nhưng nó tỏ ra hiệu quả trong việc tạo ra cảnh báo và đi kèm với giao diện người dùng.
[48]	Khôi phục hệ thống giám sát nước nông thôn, tập trung vào cách thức giao tiếp NLoS và các vị trí xa xôi gây khó khăn cho GSM, và cách mạng LoRa/ không di động tùy biến có thể là một lựa chọn hấp dẫn và đáng tin cậy.	Các phép đo thực nghiệm về truyền dẫn LoRa cho thấy sự phụ thuộc vào độ cao của máy thu và máy phát, đồng thời hiệu suất kém hơn so với các mô hình thực nghiệm. Đề xuất chuyển đổi sang các giao thức di động khác ngoài GSM.
[49]	Nghiên cứu này phát triển một hệ thống giám sát sông tập trung vào mức tiêu thụ điện năng, cho thấy truyền dẫn vô tuyến là hoạt động tiêu tốn nhiều năng lượng nhất đối với nút và cách các chế độ đo quan trọng ảnh hưởng đến lãng phí năng lượng.	Khi pin năng lượng mặt trời không được sạc lại và ở chế độ quan trọng, tuổi thọ pin của nút cảm biến sẽ giảm 57%. Tỷ lệ đo lường thành công cũng phụ thuộc vào hình nón được sử dụng cho cảm biến siêu âm.
[50]	Việc triển khai nút cảm biến cho Flood EW WSN với mức tiêu thụ năng lượng thấp đạt được thông qua thuật toán ngủ sâu chuyên dụng và thử nghiệm để đánh giá mức tiêu thụ điện năng	Dòng điện trung bình là 13 mA trong thời gian thiết lập và giám xuống mức trung bình là 0,3 mA ở pha chờ. Do thời gian thức dậy và truyền dữ liệu ngắn nên cần hơn 280 ngày để xả hết pin 2200 mAh. Việc triển khai WSN đầy đủ và lưu lượng truy cập cao vẫn chưa được thử nghiệm.
[44]	Nghiên cứu điển hình cho hệ thống EW có tên là SENDI tập trung vào khả năng chịu lỗi thông qua mô hình cụm và các nút cảm biến có mô hình dự báo nhúng và thuật toán tự tổ chức.	Hệ thống phân cụm và các mô hình dự báo đã được thử nghiệm thông qua mô phỏng, cho thấy kết quả tốt về tối ưu hóa năng lượng, khả năng chịu lỗi và độ chính xác. Một hạn chế là yêu cầu số lượng nút lớn để hoạt động hiệu quả. Độ chính xác dự báo lũ đạt 98%.
[51]	Phát triển WSN có dữ liệu được sử dụng để đào tạo và xác thực mô hình học máy SVM có thể được nhúng vào các nút điều phối WSN.	Ngưỡng kiến trúc phụ thuộc vào vị trí, do đó hệ thống cần phải thu thập dữ liệu (nếu không có sẵn) và tính toán chúng trước. Có sự mơ hồ đối với dữ liệu từ các điểm cuối chồng chéo. Giao tiếp LoRa hoạt động mà hầu như không bị mất dữ liệu.
[52]	Phát triển hệ thống cảnh báo sớm dựa trên thị giác máy tính, sử dụng hình ảnh từ mạng cảm biến camera CMOS và so sánh chúng với các tài liệu tham khảo đã lưu trữ bằng kỹ thuật so sánh hình ảnh.	Các thuật toán được phát triển có thể cung cấp các đường cong liên quan đến: (i) mức độ thảm họa, (ii) đường cong đăng ký hình ảnh, (iii) độ chính xác, (iv) đường cong nhận dạng đối tượng. Một nền tảng web cũng đã được phát triển để cung cấp các biểu đồ cho người dùng.
[53]	Đề xuất mạng lưới cảm biến và bộ truyền động không dây dựa trên nền tảng đám mây để cảnh báo lũ lụt và mở các cửa xả để nước chảy ra khỏi nguồn nước được giám sát nếu cần.	Một thuật toán để quản lý các cảm biến và bộ truyền động cũng đã được xác thực thành công thông qua phân tích mô hình, chỉ định các phương pháp kiểm tra khác nhau đối với nước. Bài báo không đề xuất một giao thức truyền thông cụ thể để gửi dữ liệu qua Đám mây hoặc đến các bộ truyền động.

Trong kịch bản của hệ thống cảnh báo lũ lụt, giải pháp do Basha và cộng sự [25] phát triển và triển khai thành công ở Honduras và Massachusetts, bao gồm một WSN không đồng nhất với các nút khác nhau có thể bao phủ khoảng cách lớn và tránh các điểm lỗi đơn lẻ.

Mặc dù thành công, Jayashree et al. [46] chỉ ra rằng loại giải pháp này có nhược điểm là cần nhiều loại nút khác nhau và xử lý dữ liệu không đồng nhất; do đó, nó tốn kém hơn và yêu cầu tính toán phức tạp hơn. Họ đề xuất một kiến trúc EW chung và đơn giản để giải quyết vấn đề này và các vấn đề khác như mức tiêu thụ điện năng, khả năng phục hồi khi không có vùng phủ sóng di động, độ trễ ít hơn và tính toán ngắn hơn. Kiến trúc bao gồm các cảm biến lưu lượng và mực nước chỉ gửi dữ liệu đến máy chủ khi dữ liệu cảm nhận tăng lên trên ngưỡng cố định. Một ứng dụng Android sẽ được sử dụng cho người dùng di động, hoạt động với phần cứng Zigbee được kết nối với điện thoại di động thông qua mô-đun USB On-The-Go để liên lạc, do đó hệ thống vẫn hoạt động ngay cả khi vùng phủ sóng di động bị giảm, nhưng cách tiếp cận này yêu cầu người dùng phải được trang bị hệ thống USB On-The-Go nói trên.

Trong kiến trúc dựa trên IoT EW lưu lượng do Sood và cộng sự đề xuất [26], lớp IoT chịu trách nhiệm thu thập và tổng hợp dữ liệu từ các cảm biến và Lớp điện toán sương mù được sử dụng để giảm độ trễ bằng cách xử lý trước dữ liệu thô từ các cảm biến trước khi gửi đến các lớp cao hơn, điều này rất hữu ích để đảm bảo dự đoán kịp thời và giảm lượng dữ liệu gửi đến đám mây. Một mô hình dự báo cũng được triển khai trong các nút sương mù. Khung được đề xuất trong [26] cũng giới thiệu một phép chia lực giác có kích thước thay đổi của không gian được giám sát để bao phủ các khu vực rộng lớn trong khi cung cấp cảm biến thống nhất, yêu cầu chi phí được tối ưu hóa và tiết kiệm năng lượng dựa trên xác suất lưu lượng trong mỗi phép chia lực giác: bằng cách xác định năm nhân xác suất lưu lượng, các lực giác mà khu vực được giám sát được chia có thể được phân loại để chỉ các lực giác có xác suất lưu lượng cao mới có tất cả các cảm biến hoạt động, trong khi các thiết bị ở khu vực có xác suất thấp có thể được đưa vào chế độ ngủ, giảm thiểu lãng phí năng lượng.

Tận dụng cơ sở hạ tầng viễn thông hiện có để kết nối thường là một trong những giải pháp tốt nhất và dễ dàng nhất, như được thể hiện trong trường hợp sử dụng do Ibarreche và cộng sự [47] phát triển tại Colima, Mexico, sử dụng mạng 3G và giao thức Truyền dữ liệu từ xa hàng đợi tin nhắn (MQTT) để gửi dữ liệu đến máy chủ đám mây từ xa để xử lý và lưu trữ dữ liệu. Hệ thống cũng sử dụng các thiết bị trôi (nút cảm biến di động) với mô-đun LoRa để chuyển tiếp dữ liệu đến các nút được kết nối 3G. Lượng dữ liệu lớn từ các nguồn dữ liệu khác nhau và mạng lưới truyền thông đáng tin cậy giúp giải pháp này thành công trong việc cung cấp cảnh báo kịp thời, nhưng đi kèm với chi phí cao.

Mạng di động thường cung cấp vùng phủ sóng tốt ở hầu hết các địa điểm và việc triển khai 5G trong tương lai sẽ cải thiện hiệu suất của chúng hơn nữa. Điều này không phải lúc nào cũng đúng, vì một số địa điểm có thể có vùng phủ sóng kém do vấn đề truyền tín hiệu không theo đường truyền thẳng (NLoS) hoặc do không có đủ trạm gốc để phủ sóng toàn bộ khu vực triển khai cảm biến. Trong trường hợp này, một giải pháp tốt hơn có thể đạt được là tạo ra các mạng ad hoc sử dụng các giao thức như LoRaWAN, như Nordin và cộng sự đã quan sát thấy trong [48]. Họ đã đánh giá hiệu suất vô tuyến của cả LoRaWAN và GSM trong môi trường nông thôn với vùng phủ sóng di động yếu và với các nhà cung cấp mạng di động khác nhau (trong trường hợp GSM). Họ chỉ ra rằng công nghệ 2G không phải lúc nào cũng phù hợp với loại ứng dụng này và cần phải chuyển sang các công nghệ mới hơn như LTE hoặc NB-IoT, đồng thời chứng minh tiềm năng của LoRaWAN trong bối cảnh này.

Các tình huống quan trọng như mực nước dâng cao vượt ngưỡng nhất định có thể yêu cầu các cảm biến thực hiện nhiều phép đo hơn, với mức tiêu thụ năng lượng lớn hơn nhiều. Đối với các cảm biến được trang bị hệ thống quang điện, điều kiện thời tiết bất lợi có thể ảnh hưởng đến việc sạc lại pin. D. Purkovic và cộng sự [49] đã tính đến các yếu tố này để đánh giá ngân sách năng lượng của giải pháp do họ phát triển dựa trên EnOcean để lập kế hoạch tốt hơn trước khi triển khai. Họ đã sử dụng một cảm biến siêu âm chung có hai chế độ hoạt động: chế độ bình thường và chế độ tới hạn. Khi mực nước dâng cao hơn một ngưỡng nhất định, thiết bị sẽ chuyển sang chế độ tới hạn, thực hiện nhiều phép đo hơn và truyền tất cả các phép đo đó. Nghiên cứu cho thấy hoạt động ở chế độ tới hạn và chế độ tối làm giảm tuổi thọ pin xuống còn hơn một nửa ở chế độ hoạt động bình thường.

Ragnoli et al. [50] cũng đã phát triển một giải pháp tập trung nhiều vào mức tiêu thụ năng lượng. Hệ thống của họ bao gồm một kiến trúc LoRa tiêu chuẩn, với một nút cảm biến giao tiếp với máy chủ thông qua một cổng. Các cảm biến được sử dụng là cảm biến điện trở, có khả năng phát hiện

Sự hiện diện của nước và chi phí rất thấp so với các cảm biến khác, nhưng quy trình xử lý cũng rất đơn giản vì chúng hiển thị trạng thái bật/tắt khi có nước. Ba cảm biến được đặt ở các độ cao khác nhau trong khu vực được giám sát, thu được các ngưỡng và mức độ ngập khác nhau từ 0 đến 2. Mức tiêu thụ năng lượng thấp đạt được nhờ thuật toán ngủ sâu chuyên dụng. Các thử nghiệm đã được thực hiện để đánh giá mức tiêu thụ năng lượng, đặc biệt là xem xét hoạt động ban đêm, khi pin không được sạc lại bằng cách thu thập năng lượng mặt trời. Vì giai đoạn thức dậy và truyền dữ liệu được giữ rất ngắn so với giai đoạn ngủ, nên có thể đạt được hiệu suất tốt về thời lượng pin. Mặc dù một nút cảm biến đã được thử nghiệm đầy đủ, nhưng việc triển khai WSN đầy đủ chưa được thử nghiệm, và mặc dù hệ thống có khả năng mở rộng, việc quản lý lưu lượng cần được tính đến và có thể không mở rộng đúng cách với nhiều thiết bị.

Các giao thức hỗ trợ mạng lưới dạng lưới, như Zigbee, đặc biệt hữu ích cho các khu vực, chẳng hạn như lưu vực sông, nơi nút trung tâm có thể bị lỗi và do đó, việc triển khai dạng lưới được khuyến nghị và đã được chứng minh là cung cấp độ tin cậy tốt hơn so với kiến trúc hình sao hoặc hình cây về mặt mất gói tin [54]. Cần tập trung vào việc xử lý tình trạng mất nút trong các giải pháp đã phát triển để đảm bảo WSN tiếp tục hoạt động trong điều kiện vận hành khó khăn. Furquim và cộng sự [44] đề xuất một mô hình EW thể hiện khả năng chịu lỗi và hỏng nút cao, đặc biệt là trong điều kiện môi trường khắc nghiệt. Kiến trúc được chia thành ba tầng: (i) các nút cảm biến, (ii) lớp điện toán sương mù và (iii) lớp đám mây. Khả năng chịu lỗi đạt được bằng cách cung cấp cho các nút từ hai lớp đầu tiên các thuật toán tự tổ chức và các mô hình dự báo 'nhẹ' cho phép chúng đưa ra dự đoán nếu không thể kết nối với đám mây, mặc dù độ chính xác thấp hơn. Nếu các nút từ tầng thứ hai bị xâm phạm, các nút lớp đầu tiên sẽ đảm nhận nhiệm vụ tổng hợp dữ liệu từ các nút khác cùng lớp. Hệ thống báo động và âm thanh được trang bị ở lớp đầu tiên cho phép tạo báo động cục bộ trong trường hợp hệ thống truyền thông bị xâm phạm nghiêm trọng. Để đạt được mức độ chịu lỗi này, mô hình cần một số lượng lớn các nút.

Ali et al. [53] đã đề xuất một mạng lưới cảm biến và bộ truyền động không dây dựa trên đám mây để cảnh báo lũ lụt. Hệ thống được đề xuất sẽ được triển khai không chỉ để theo dõi mực nước để có thể đưa ra cảnh báo mà còn bao gồm các bộ truyền động mở các cửa vào của người canh gác để cho nước chảy ra nếu cần. Các cảm biến mực nước và thể tích xác định trạng thái của nước và so sánh với ngưỡng. Các cổng được sử dụng để quản lý thông tin liên lạc giữa các cảm biến và tới Đám mây, được sử dụng để quản lý toàn bộ hệ thống. Một thuật toán để quản lý các cảm biến và bộ truyền động cũng đã được đề xuất và xác thực thông qua phân tích mô hình, chỉ định các kiểm tra khác nhau cho mực nước: khi đạt đến mức 'nguy hiểm', một thông báo cảnh báo sẽ được tạo ra và người canh gác sẽ được kích hoạt bởi các cổng. Mặc dù bài báo tập trung vào WSN và kiến trúc IoT nói chung, nhưng không đề xuất một giao thức truyền thông cụ thể.

Dữ liệu lũ lụt là động và phi tuyến tính, và do đó sử dụng thuật toán ML hoặc Mạng nơ-ron sâu (DNN) để hỗ trợ dự đoán là một giải pháp thường được sử dụng, đặc biệt nếu có sẵn dữ liệu lũ lụt và thời tiết trước đó từ khu vực. Có rất nhiều tài liệu về Mạng nơ-ron và DNN được sử dụng để dự đoán lũ quét và các phương pháp tiếp cận dựa trên kiến thức về dữ liệu trước đó và bản đồ lũ lụt cũng như dữ liệu mới đến từ giải pháp WSN đã chọn, trong đó giao tiếp tốt là điều cần thiết, cùng với việc lựa chọn đúng các tham số đo lường và định vị mạng. Ví dụ, Anbarasan et al. [55] đề xuất một sơ đồ khối chung để dự đoán lũ lụt bằng DNN tích chập theo phương pháp cảm biến dữ liệu, giao tiếp và dự đoán đã đề cập ở trên. Thuật toán xử lý dữ liệu đã phát triển và Mạng nơ-ron tích chập (CNN) cho thấy kết quả tốt hơn so với các hệ thống sử dụng Mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) hoặc Mạng nơ-ron sâu (DNN) khi được xác thực bằng dữ liệu radar Doppler.

Al Qundus và cộng sự [51] đã triển khai tại Kuwait một hệ thống cảnh báo lũ lụt sử dụng Học máy trên dữ liệu thu thập được từ mạng lưới cảm biến để đưa ra cảnh báo. Họ đã triển khai 24 cảm biến và 6 bộ điều phối/bộ thu, chia khu vực được giám sát thành 6 vùng. Các cảm biến được sử dụng là cảm biến mực nước, nhiệt độ, độ ẩm và tốc độ gió, và các nút điều phối cũng sử dụng Google Weather API để lấy thêm dữ liệu. LoRaWAN được sử dụng cho công nghệ truyền thông. Vì không có nhiều cảm biến, số lượng dữ liệu đọc được từ mỗi cảm biến

phải được nâng lên. Dữ liệu thu thập được trong hơn một năm đã được sử dụng để hình thành một bộ đào tạo được sử dụng để đào tạo mô hình Máy vectơ hỗ trợ (SVM) sau đó được triển khai trên mỗi nút điều phối và xác thực cho thấy độ chính xác 98% trong việc phát hiện lũ lụt. ngưỡng cho các cảm biến phải được tính toán mỗi khi một giải pháp mới được triển khai trong một vị trí mới (cần có thời gian để thu thập dữ liệu nếu dữ liệu trước đó không có sẵn) và có sự mơ hồ đối với dữ liệu đến từ các điểm cuối chồng lấn, tức là từ các vị trí giao nhau, và cần có sự phân cụm và phân tách vị trí tốt hơn.

Như đã đề cập, hệ thống dựa trên camera và Thị giác máy tính cũng có thể được sử dụng cho Cảnh báo sớm lũ lụt. Thekkil et al. [52] đã phát triển một nền tảng IoT sử dụng tính năng đơn giản thuật toán trích xuất và so sánh hình ảnh sử dụng dữ liệu thu được từ camera CMOS và hình ảnh từ cơ sở dữ liệu để tạo ra các đường cong đưa ra thứ hạng về mức độ nguy hiểm của lũ lụt tai họa. Các hình ảnh nên được thu thập từ mạng camera bằng Zigbee, được chuyển tiếp đến một cổng GSM và sau đó được gửi đến một máy chủ xử lý để phân tích, với Ưu điểm là giá thành thấp và kinh tế.

4.2. Kiến trúc IoT cho Hệ thống Cảnh báo Lũ lụt

Tham khảo kiến trúc phân lớp được mô tả trong phần Giới thiệu, Bảng 2 liệt kê các đơn vị cảm biến, công nghệ truyền thông và các phương pháp dự đoán được sử dụng, và các các ứng dụng được phát triển trong mỗi bài báo được đánh giá. Bảng cũng nêu bật nếu một Edge/Fog mô hình điện toán đã được áp dụng hay chưa trong từng trường hợp sử dụng được xem xét.

Bảng 2. Công nghệ và giải pháp được sử dụng cho từng lớp của các bài báo được đánh giá về Flood EW.

Lớp nhận thức bài viết		Giao tiếp Lớp	Lớp ứng dụng và lớp cạnh	Cạnh/Sương mù Máy tính
[46]	Mức nước, Lưu lượng nước	Zigbee	Phân tích dữ liệu và cảnh báo dựa trên ngưỡng tại máy chủ từ xa; điện thoại thông minh Android ứng dụng	KHÔNG.
[26]	Cảm biến lưu lượng nước, nước cảm biến mức nước và giá trị mưa.	Không có đề xuất nào	Phương pháp Holt-Winter để dự đoán tại máy chủ từ xa; xử lý sớm và dự đoán ở cấp độ cảm biến/cổng kết nối	Đúng.
[47]	Giám sát, khí tượng, và các trạm di động	3G/GSM, LoRA	Nền tảng đám mây IoT để tiếp nhận, quản lý và lưu trữ dữ liệu cảm biến; hệ thống cảnh báo semaphore	KHÔNG.
[48]	Các trạm HMS	GSM, LoRA	Xử lý và lưu trữ dữ liệu từ xa máy chủ	KHÔNG.
[49]	Cảm biến siêu âm	EnOcean	Giám sát mức nước tại máy chủ từ xa	KHÔNG.
[50]	Cảm biến điện trở	LoRa	Hệ thống báo động dựa trên ngưỡng tại Cloud cấp độ; lưu trữ và phân tích dữ liệu trên riêng biệt trang web	KHÔNG.
[44]	Áp suất nước, đồng hồ đo lượng mưa 6LoWPAN		Dự báo học máy tại Cloud và mức cảm biến; Báo động bằng hình ảnh và âm thanh hệ thống	Đúng.
[51]	Cảm biến gió, độ ẩm cảm biến, cảm biến nhiệt độ và cảm biến mức nước	LoRa	Mô hình SVM được nhúng trong bộ tập trung các nút để phân loại rủi ro; quyết định cuối cùng tại Máy chủ đám mây	Đúng.
[52]	Máy ảnh CMOS	Zigbee, GSM	Nền tảng web; thuật toán để có được thông tin như cấp bậc của thảm họa và độ chính xác	KHÔNG.
[53]	Mức nước, Thể tích nước Không có đề xuất nào		Hệ thống cảnh báo dựa trên ngưỡng; Đám mây giải pháp quản lý bộ truyền động	Đúng.

Có thể đo các đại lượng khí tượng và thủy văn khác nhau đối với lũ quét Các dự đoán, chẳng hạn như: mức nước, vận tốc nước, lượng mưa, nhiệt độ và áp suất khí quyển. Cùng với những số liệu này, thành phần đất, địa hình và độ ẩm đất

có thể ảnh hưởng đến lũ lụt và dữ liệu dự báo thời tiết có thể được sử dụng để tăng cường dự đoán.

Các cảm biến trong Lớp Nhận thức có thể được tích hợp với các cảm biến khác như các đơn vị Hệ thống Định vị Toàn cầu (GPS). Hệ thống camera thông minh có thể được sử dụng riêng lẻ hoặc kết hợp với các cảm biến theo dõi số lượng thủy lực và khí tượng [56], nhưng chúng yêu cầu phân tích dữ liệu sâu hơn và các thuật toán học sâu hoặc xử lý hình ảnh trên Lớp Ứng dụng (một đánh giá toàn diện về các phương pháp thị giác máy tính để theo dõi lũ lụt của Arshad và cộng sự được báo cáo trong [20]). Sự hiện diện của các trạm thời tiết hoặc trạm quan trắc thủy văn-địa chất có sẵn có thể tạo điều kiện thuận lợi cho việc triển khai hệ thống EW. Việc định vị và lắp đặt chính xác các thiết bị IoT là điều cần thiết để đạt được kết quả tốt và tùy thuộc vào số lượng thiết bị được lắp đặt, giải pháp có thể có những nhược điểm: số lượng lớn thiết bị IoT sẽ làm tăng chi phí và sẽ tạo ra dữ liệu dư thừa; quá ít sẽ làm giảm hiệu quả của các dự đoán [26].

Khi nói đến lớp Truyền thông, một số giải pháp được xem xét vẫn dựa vào các mô-đun GSM, 3G hoặc GPRS cho truyền thông tầm xa, trong khi các giải pháp di động mới (như 5G hoặc Narrowband-IoT) có thể cung cấp vùng phủ sóng tốt hơn và độ trễ thấp hơn cũng như hiệu suất tổng thể tốt hơn. Các mạng ad hoc được hỗ trợ bởi các giao thức có tầm xa như LoRa cũng là một giải pháp và chúng có thể đạt được ngân sách liên kết cao trong các môi trường khó khăn, nhưng chúng yêu cầu phải cài đặt một cổng. Hơn nữa, các giao thức hoạt động trong các băng tần ISM như LoRa có thể bị suy giảm nếu có một số lượng lớn thiết bị truyền cùng một lúc [48,57]. Zigbee là giải pháp được sử dụng nhiều nhất khi nói đến truyền thông tầm ngắn và hỗ trợ Zigbee cho mạng lưới được coi là hữu ích để tồn tại trong các lỗi mạng cảm biến.

Cuối cùng, trong khi nhiều giải pháp được đánh giá vẫn sử dụng nền tảng hoặc máy chủ Đám mây để lưu trữ và xử lý dữ liệu hoặc chạy các mô hình ML, các giải pháp lớp Fog/Edge được khuyến nghị để cải thiện hiệu quả tổng thể của hệ thống, cả về độ trễ và lượng dữ liệu được truyền trên mạng. Các mô hình Học máy có thể nâng cao kết quả dự đoán và chúng có thể được nhúng vào các thiết bị Fog. Các cảnh báo dựa trên ngưỡng đơn giản hơn cũng có thể hiệu quả để tạo ra một giải pháp Edge và tạo ra các cảnh báo nhanh hơn, và chúng dễ dàng được triển khai hơn trên các nút cảm biến cục bộ.

#### 4.3. Yêu cầu và hạn chế hệ thống đối với hệ thống EW lũ lụt

Các yêu cầu hệ thống quan trọng được nêu bật trong tài liệu đã được xem xét là: (i) phạm vi phủ sóng ở các khu vực xa xôi và địa hình khó khăn, có thể yêu cầu loại bỏ một số giải pháp IoT vì chúng có thể không phù hợp với các môi trường đó; (ii) mức tiêu thụ năng lượng, đặc biệt là trong một số điều kiện môi trường hoặc thời tiết nhất định (chẳng hạn như "chế độ tối" hoạt động khi sử dụng nguồn cung cấp năng lượng quang điện) hoặc khi cần đáp ứng một số yêu cầu đo lường nhất định; và (iii) khả năng chịu lỗi và khả năng của mạng cảm biến để tiếp tục hoạt động ngay cả khi một số nút bị lỗi do pin yếu hoặc điều kiện thời tiết khắc nghiệt.

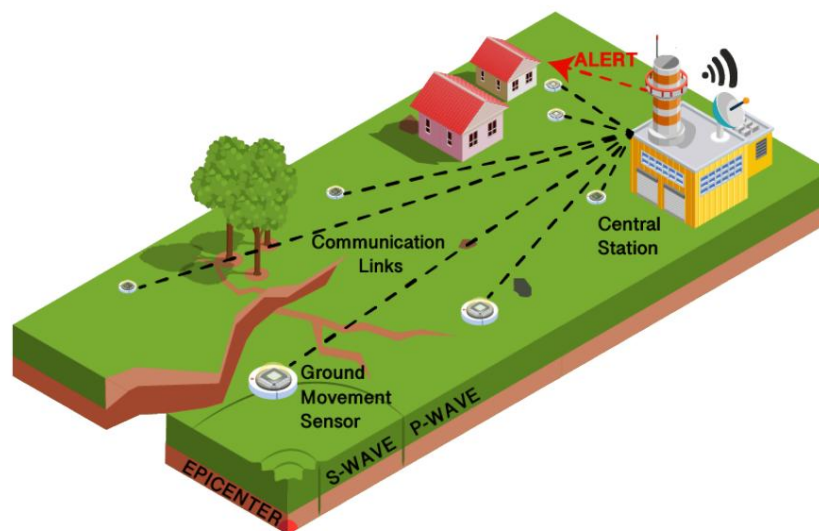
Trong khi việc mất các nút được tính đến trong một số bài viết được đánh giá và lưới các giải pháp được đề xuất để tránh các điểm lỗi đơn lẻ, các hệ thống có khả năng chịu lỗi cao yêu cầu một số lượng lớn cảm biến để hoạt động bình thường và hầu hết các trường hợp sử dụng không tính đến tác động của lượng mưa lớn và điều kiện thời tiết khắc nghiệt đối với kênh truyền thông, ví dụ như không lập kế hoạch cho hệ thống dự phòng hoặc an toàn, như cũng đã lưu ý trong [23,58].

Việc đánh giá ngân sách liên kết rất quan trọng để xác định xem một khu vực có thể được phục vụ tốt bởi một dịch vụ (ví dụ, ở những khu vực có nhiều cây cối rậm rạp hoặc vùng nông thôn xa xôi) hay mạng ad-hoc. Các dịch vụ hoạt động trên băng tần ISM như LoRaWAN có thể cung cấp vùng phủ sóng tốt, nhưng chúng cũng có thể gặp một số hạn chế do tài nguyên vô tuyến dùng chung. Các trường hợp xấu nhất cũng nên được đánh giá về thời lượng pin, khi thời tiết có thể hạn chế việc thu thập năng lượng mặt trời hoặc khi cần tần số lấy mẫu cao hơn trong quá trình đo lường.

#### 5. Động đất: Hệ

thống EW động đất cũng có thể được hưởng lợi từ Internet vạn vật và các công nghệ liên quan. Các cảm biến và bộ phận cảm biến có thể theo dõi rung động và chuyển động của mặt đất để

tạo ra báo động và cảnh báo người dân ở một số nơi trước khi sóng động đất ập đến họ. Ngay cả vài giây hoặc vài phút cảnh báo cũng có thể rất quan trọng trong việc cứu sống người. Phương pháp phổ biến nhất để phát hiện động đất là phát hiện sóng P. Khi động đất xảy ra, sóng P nén và sóng S ngang sẽ phát ra từ tâm chấn. Vì sóng P di chuyển nhanh hơn nhưng ít gây thiệt hại hơn, nếu được phát hiện, chúng có thể được sử dụng để chuyển tiếp cảnh báo trước khi sóng S có sức tàn phá lớn hơn đến một địa điểm. Hình 3 minh họa một triển khai chung của Hệ thống Cảnh báo Sớm Động đất dựa trên phát hiện sóng P.



Hình 3. Ví dụ về việc triển khai Hệ thống cảnh báo sớm động đất dựa trên IoT và phát hiện sóng P.

Một hệ thống IoT rất đơn giản dựa trên phương pháp này là hệ thống do Alphonsa và cộng sự [59] đề xuất, sử dụng các máy đo gia tốc được kết nối với bộ vi điều khiển để thu thập và xử lý các phép đo rung động mặt đất, sau đó gửi dữ liệu bằng Zigbee đến bộ thu được kết nối với PC, bộ thu này được sử dụng để chuyển tiếp cảnh báo đến người dùng. Các mô-đun GSM cũng có thể được sử dụng để gửi cảnh báo đến trạm thu phát gốc, sau đó trạm này sẽ cảnh báo người dùng điện thoại di động.

Các hệ thống EW để theo dõi động đất đã được phát triển ở nhiều quốc gia, nhưng vẫn còn những nỗ lực để tối ưu hóa mạng lưới cảm biến, cung cấp thông tin liên lạc đáng tin cậy và độ trễ thấp, đồng thời giảm độ trễ xử lý dữ liệu, thường là yếu tố quan trọng nhất góp phần vào độ trễ chung của hệ thống cảnh báo động đất [60].

Khi một tín hiệu EW động đất được tạo ra bởi mạng hoặc trung tâm xử lý, mỗi mili giây chậm trễ để gửi tín hiệu tương ứng với việc tăng khoảng 8 m bán kính khu vực mà động đất tiếp cận [35]. Điều này có nghĩa là độ trễ giảm là một điều kiện tiên quyết thiết yếu trong EW động đất và phải xem xét các ràng buộc thời gian chính xác. Do đó, thời gian cảnh báo và thu thập dữ liệu địa vật lý phải từ vài giây đến vài phút. Vì thiệt hại lớn nhất do động đất gây ra thường nằm trong một chu vi nhất định xung quanh tâm chấn, nên mục tiêu quan trọng nhất của hệ thống EW động đất là cung cấp báo động trong vòng vài giây đến khu vực này, trong khi các cảnh báo chính xác hơn đến các khu vực lớn hơn sau đó có thể được gửi trong hàng chục giây [6]. Với các thuật toán xử lý dữ liệu được tối ưu hóa và độ trễ dữ liệu giảm xuống còn 1 giây, có thể đạt được hiệu suất cao nhất có thể là 3–6 giây để tạo và phổ biến cảnh báo EW động đất [61].

#### 5.1. Các trường hợp sử dụng được đánh giá cho Earthquakes EW

Bảng 3 chứa các bài báo đã được đánh giá về EW động đất tập trung vào một số vấn đề quan trọng khi thiết kế hệ thống cảnh báo sớm động đất, chẳng hạn như giảm độ trễ giao tiếp và thuật toán, đồng bộ hóa và lựa chọn mật độ nút WSN.



Bảng 3. Các bài viết được đánh giá trong Earthquake EW.

Bài báo	Trọng tâm và Mục tiêu Đề	Kết quả
[53]	xuất và thử nghiệm thuật toán động đất SWEDA để phát hiện và cảnh báo động đất trong vài mili giây , đồng thời tối ưu hóa chi phí tính toán, đồng thời thiết kế và sản xuất 2 loại nút cảm biến. Hệ thống cũng có khả năng phát hiện các loại sóng địa chấn khác nhau.	Giải pháp đã được thử nghiệm với ba hệ thống khác nhau được lắp đặt tại các địa điểm SHM ở Đại học Qatar và nó đã xác định được sóng p 11 giây trước khi sóng s được kích hoạt lần thứ hai, cho thấy khả năng cảnh báo động đất tốt.
[62]	Đề xuất một phương pháp tiếp cận điện toán biên phân tán cho EEW sử dụng các trạm GPS và máy đo địa chấn để chạy ML mô hình. Phương pháp phân tán sẽ làm giảm lượng dữ liệu được truyền tới Đám mây và cung cấp một hệ thống có khả năng phục hồi tốt hơn trong trường hợp xảy ra động đất lớn.	Các trạm GPS và máy đo địa chấn có hiệu suất bổ sung (với động đất lớn, độ chính xác dự báo là 99% đối với GPS, 28% đối với máy đo địa chấn). Do đó, họ đã đánh giá một mô hình đa tham số, xác nhận rằng mô hình kết hợp là lựa chọn tốt hơn về mặt độ chính xác.
[63]	Mô hình hóa và mô phỏng WSN cho Earthquake EW và đánh giá hiệu suất của nó thay đổi như thế nào tùy thuộc vào các thông số WSN khác nhau, chẳng hạn như giao thức đồng bộ hóa, tần suất lấy mẫu và mật độ nút.	TPSN cho sai số về vận tốc và định vị cao hơn từ 0,6 đến 6 lần và từ 1 đến 5 lần so với đồng bộ hóa hoàn hảo, nhưng sai số cao hơn từ 5 đến 266 lần và từ 96 đến 361 lần khi không đồng bộ hóa. Sử dụng 5 nút, một nút bị lỗi sẽ làm hỏng 25% dữ liệu, trong khi với 25 nút, chỉ có 4% dữ liệu bị hỏng. Tần số lấy mẫu cao hơn cũng cải thiện hiệu suất.
[64]	Phát triển và thử nghiệm một nút cảm biến cho mạng lưới EW động đất dày đặc, đạt được chi phí thấp bằng cách sử dụng cảm biến MEMS và các đơn vị TCP/IP độc lập để xử lý thông tin liên lạc, do đó thiết bị có thể được điều khiển bằng MCU đơn giản và rẻ tiền.	Dữ liệu từ các mảng cảm biến giá rẻ có tính nhất quán tốt với dữ liệu từ các máy đo địa chấn tiêu chuẩn và các pha địa chấn thu được đủ chính xác cho EW. Ngay cả những trận động đất nhỏ cũng được phát hiện trong phạm vi 20 km tính từ các cảm biến. Những trận động đất lớn hơn (M 4,7) được phát hiện ở khoảng cách lên đến 200 km tính từ các cảm biến.
[65]	Đánh giá hiệu suất của một mảng cảm biến địa chấn dựa trên MEMS dày đặc với 170 cảm biến (dựa trên thiết kế được phát triển trong [66]) để chứng minh rằng chúng có thể được phân loại là cảm biến loại B.	Các cảm biến được đề xuất có hiệu suất tương đương với các cảm biến động đất 'truyền thống' với tỷ lệ phần trăm chênh lệch dưới 10%, ngay cả khi ở xa tâm chấn (150 km). Các trạm có chênh lệch lớn hơn 20% là do lỗi hiệu chuẩn.
[67]	Thiết kế và thử nghiệm nền tảng cảnh báo động đất dựa trên đám mây, chi phí thấp có tên là Earthcloud, sử dụng các máy đo địa chấn để phát hiện chuyển động mạnh và đưa ra cảnh báo đầu tiên cho AWS IoT bằng MQTT, sau đó xử lý dữ liệu bằng Amazon Kinesis để đưa ra cảnh báo chính xác.	Một trong ba cảm biến được sử dụng để thử nghiệm giải pháp Earthcloud đã bị lỗi (không phân biệt được tiếng ồn nền và dữ liệu động đất), trong khi hai cảm biến còn lại cho kết quả tương đương với kết quả mà cơ quan quản lý quốc gia đưa ra.
[68]	Bài viết đề xuất và xác thực kiến trúc 3 lớp sử dụng điện thoại thông minh để tạo ra mạng lưới EW động đất rộng khắp MCS, sử dụng lớp trung gian giữa các cảm biến và lớp ứng dụng để đảm bảo độ tin cậy.	Quá trình xác thực cho thấy dự đoán đỉnh địa chấn trước 12 giây, nhưng giai đoạn xác thực vẫn cần được cải thiện. Mức tiêu thụ điện năng thấp (4,9%) đã đạt được.
[69]	Tổng quan và đánh giá hiệu suất của ứng dụng theo dõi động đất trên điện thoại thông minh MyShake thông qua mô phỏng, tập trung vào khả năng sử dụng ứng dụng này cho EW.	Điện thoại MyShake phát hiện động đất 3,8 giây sau thời điểm ban đầu và hệ thống nhận diện sự kiện khi 26 điện thoại được kích hoạt, 15,6 giây trước khi sóng S lan đến thành phố được giám sát, nhưng lại đánh giá thấp hơn một chút về cường độ. Độ trễ gửi cảnh báo là 2,8 giây, nhưng có thể giảm xuống và chưa rõ nó sẽ mở rộng như thế nào với nhiều thiết bị.
[35]	Đề xuất hệ thống cảnh báo sớm sử dụng SHM để phát hiện các sự kiện địa chấn và đánh giá những lợi thế của cổng 5G trong bối cảnh này, sử dụng dịch vụ URLLC.	Độ trễ sẽ được giảm (<1 ms) trong khi vẫn duy trì độ tin cậy rất cao khi sử dụng URLLC. Mặc dù kiến trúc hệ thống được đề xuất và mạng 5G mang lại lợi thế trong hai hạn chế chính của Earthquake EW, các thử nghiệm thực địa vẫn cần được thực hiện.
[70]	Đánh giá hiệu suất của WSN tiết kiệm năng lượng cho SHM được tích hợp với hệ thống EW động đất, sử dụng các mô-đun WoR để giảm thiểu mức tiêu thụ năng lượng cần thiết để đánh thức WSN khi phát hiện động đất bằng máy dò sóng P.	Các mô-đun WoR và kích hoạt vô tuyến cho phép các nút chuyển sang chế độ ngủ hoàn toàn khi không cần cảm biến, giảm mức tiêu thụ điện năng xuống còn 350 μA với độ trễ 229 ms để đánh thức các nút, với hiệu suất tốt hơn IEEE 802.15.4.

Tariq et al. [53] đã đề xuất và thử nghiệm Thuật toán Phát hiện Sự kiện Sóng địa chấn (SWEDA) để đạt được khả năng phát hiện và cảnh báo động đất trong mili giây. Thuật toán này sử dụng các nút máy đo độ nghiêng cho Công nghiệp 4.0 và giao thức truyền thông CANOpen cho IoT công nghiệp. Họ đã thiết kế và sản xuất hai loại nút cảm biến: một máy đo độ nghiêng phẳng bao gồm hai máy đo gia tốc và một máy đo hình trụ bao gồm bảy cảm biến được ghép nối với ADC sigma-delta 24 bit và bộ khuếch đại khuếch đại có thể lập trình để tăng độ phân giải. Bên cạnh sóng P, hệ thống này cũng có thể phát hiện sóng S, sóng Rayleigh và sóng Love, nhưng cần đặt các vị trí cảm biến khác nhau để phát hiện các loại sóng khác nhau với nỗ lực tính toán thấp (phù hợp với vị trí của các cảm biến và hướng/độ dịch chuyển góc của trận động đất). Thuật toán xử lý dữ liệu đã được tối ưu hóa để tránh báo động giả và giảm chi phí tính toán của các phép toán và hiệu chuẩn đầu vào, điều sau là cần thiết để tránh báo động giả. Giải pháp đã được thử nghiệm với ba hệ thống khác nhau được lắp đặt tại các địa điểm Giám sát Sức khỏe Kết cấu (SHM) tại Đại học Qatar. Hệ thống có thể xác định động đất do tác động tại chỗ, với lần kích hoạt đầu tiên cho sóng P 11 giây trước khi lần kích hoạt thứ hai cho sóng S được tạo ra, cho thấy khả năng cảnh báo

Các mô hình Học máy cũng có thể được triển khai để dự đoán động đất bằng cách sử dụng dữ liệu từ nhiều nguồn cảm biến. Fauvel và cộng sự [62] đã đề xuất một phương pháp phân tán cho Earthquake EW sử dụng dữ liệu từ các trạm GPS và máy đo địa chấn để đưa ra dự đoán dựa trên thuật toán mà họ đã xác thực trên một tập dữ liệu thực tế. Phương pháp phân tán này dựa trên điện toán Edge/Fog và nhằm mục đích giảm lượng dữ liệu được gửi trên mạng bằng cách nhúng bộ phân loại ML vào mỗi cảm biến. Bộ phân loại tạo ra đầu ra lớp được gửi đến máy chủ trung tâm kết hợp dự đoán lớp từ mỗi cảm biến để đưa ra dự đoán cuối cùng. Việc tổng hợp được tạo ra ở cấp độ cảm biến kết hợp với thực tế là thông tin được truyền không liên quan đến giá trị động đất làm giảm đáng kể nỗ lực truyền qua mạng, giảm độ trễ và giúp liên lạc dễ dàng hơn.

Bài báo cho thấy các trạm GPS và máy đo địa chấn có hiệu suất bổ sung (ví dụ, đối với các trận động đất lớn, độ chính xác của GPS là 99%, còn máy đo địa chấn là 28%). Do đó, họ đã đánh giá một mô hình kết hợp, xác nhận mô hình đa tham số là lựa chọn tốt nhất về độ chính xác.

Khedo và cộng sự [63] đã mô phỏng một mô hình WSN tại chỗ để dự đoán và phát hiện động đất ở đảo Mauritius, và họ đã phân tích cách các tham số WSN khác nhau có thể làm sai lệch hoặc tăng cường ước tính về vận tốc và vị trí của tâm chấn (thu được từ sóng P) để đánh giá tính khả thi của một hệ thống như vậy. Bài báo tập trung vào các vấn đề đồng bộ hóa cho WSN trong giám sát động đất: điều cần thiết là tất cả các nút và trạm gốc/bộ thu phải được đồng bộ hóa, nếu không, độ lệch xung nhịp giữa các nút sẽ trở thành một thành phần của độ trễ truyền sóng, do đó khiến các cảnh báo không chính xác. Kiến trúc mô phỏng sử dụng Giao thức đồng bộ thời gian cho Mạng cảm biến (TPSN) để đạt được sự đồng bộ hóa giữa các nút. Kết quả mô phỏng cho thấy rằng trong khi các mạng sử dụng giao thức TPSN để đồng bộ hóa có hiệu suất kém hơn so với các hệ thống được đồng bộ hóa hoàn hảo (lý tưởng), thì các mạng không có giao thức đồng bộ hóa nào lại có kết quả kém hơn nhiều về vận tốc và định vị tâm chấn. Bài báo cũng chứng minh rằng các mạng dày đặc hơn cung cấp dữ liệu tốt hơn và có khả năng phục hồi tốt hơn đối với các nút bị lỗi, và tần số lấy mẫu cao hơn cho phép hiệu suất tốt hơn.

Do hiệu quả phát hiện động đất phụ thuộc vào mật độ mạng, điều này có thể dẫn đến chi phí rất cao cho giải pháp EW Động đất. Hệ thống Vi cơ điện tử (MEMS) có thể cung cấp một giải pháp thay thế chi phí thấp cho các máy đo địa chấn hoặc máy đo địa chấn truyền thống và chúng có thể được sử dụng để xây dựng các mạng lưới dày đặc hơn với mức đầu tư nhỏ hơn. Fu và cộng sự [64] đã đề xuất một mạng máy đo gia tốc MEMS có thể đạt hiệu suất tương đương với mạng EW Động đất dày đặc truyền thống. Mỗi máy đo địa chấn MEMS giá rẻ bao gồm: mô-đun máy đo gia tốc MEMS, mô-đun TCP/IP, mô-đun Cấp nguồn qua Ethernet và một mô-đun lưu trữ cục bộ tùy chọn. Đồng bộ hóa được thực hiện bằng Giao thức Thời gian Mạng (NTP) được đơn giản hóa. Mô-đun TCP/IP độc lập có thể tự xử lý việc truyền dữ liệu đến máy chủ qua Ethernet, do đó, bộ phận cảm biến có thể được điều khiển bởi một đơn vị MCU đơn giản, vì nó không phải xử lý các quy trình truyền thông. Một mảng cảm biến địa chấn giá rẻ

Hệ thống bao gồm 10 cảm biến được kết nối với modem 3G/4G, được xây dựng để thử nghiệm thực địa. Dữ liệu thu được từ các cảm biến giá rẻ có độ nhất quán tốt với dữ liệu thu được từ các máy đo địa chấn tiêu chuẩn, và chúng có thể xác định các pha địa chấn rõ ràng để kích hoạt phát hiện động đất nhằm cảnh báo sớm, và ngay cả những trận động đất có cường độ nhỏ hơn ( $M_{3,1}$  đến  $M_{3,6}$ ) cũng được xác định trong phạm vi 20 km tính từ các cảm biến. Các trận động đất lớn hơn ( $M_{4,7}$ ) có thể được phát hiện ở khoảng cách lên đến 200 km tính từ các cảm biến.

Peng et al. [65] đã thử nghiệm hiệu suất của mạng lưới EW động đất dày đặc gồm 170 cảm biến mà họ có thể triển khai ở khu vực biên giới Tứ Xuyên-Vân Nam, Trung Quốc. Thiết kế cảm biến được chỉ định rõ hơn trong [66] và đó là cảm biến gia tốc kế MEMS năng lượng thấp, chi phí thấp với hiệu suất của gia tốc kế Loại B (để so sánh, cảm biến MEMS thường là cảm biến Loại C, chẳng hạn như thiết bị được sử dụng trong giải pháp đã được đánh giá trước đó [64]). Mỗi thiết bị cũng cung cấp dữ liệu phù hợp để phát hiện sóng P, tính toán các tham số cảnh báo sớm và truyền gói dữ liệu có độ trễ thấp. Đối với mỗi trạm, một bộ định tuyến 3G/4G được sử dụng để truyền dữ liệu chuyển động mặt đất được mạng ghi lại đến máy chủ xử lý. Các dữ liệu thu được từ các cảm biến đã được so sánh với dữ liệu từ các trạm động đất cổ điển, cho thấy tính nhất quán tốt, ngay cả đối với các cảm biến cách tâm chấn hơn 150 km, qua đó chứng minh rằng giải pháp chi phí thấp này có thể được sử dụng cho hệ thống EW động đất dày đặc và cho phép giảm đáng kể khoản đầu tư cần thiết để bao phủ khu vực quan tâm. Hệ thống cũng có thể tạo ra 'bản đồ rung lắc', rất hữu ích cho việc ứng phó sau thảm họa. Khi mạng lưới địa chấn tại khu vực nguồn động đất thưa thớt, sẽ có độ lệch hệ thống lớn khi tính toán bản đồ rung lắc. Hơn nữa, thường cần hơn mười phút để tạo bản đồ rung lắc, trong khi mạng lưới mật độ cao được triển khai tính toán bản đồ rung lắc với độ chính xác tốt và gần như theo thời gian thực.

Cảm biến MEMS được lắp đặt trong hầu hết các thiết bị điện thoại thông minh, do đó thông tin từ một số lượng lớn thiết bị có thể được sử dụng để tạo ra một mạng lưới địa chấn rộng khắp. Đây được gọi là mô hình cảm biến đám đông di động, hay MCS. Kiến trúc MCS là kiến trúc được đề xuất bởi Zambrano và cộng sự [68], bao gồm ba lớp: lớp 1 thu thập dữ liệu từ mạng điện thoại thông minh giá rẻ, bao gồm vị trí của người dùng bằng các thiết bị GPS của thiết bị và phát hiện các đỉnh địa chấn, đồng bộ hóa giữa các thiết bị có tham chiếu thời gian khác nhau bằng NTP; lớp 2 xác định xem có sự kiện địa chấn thực tế cần thông báo hay không và đảm bảo độ tin cậy toàn cầu của hệ thống; lớp 3 là trung tâm điều khiển và giao tiếp với các trung tâm quản lý khẩn cấp. Tính không đồng nhất cao của mạng cảm biến cũng đòi hỏi việc chuẩn hóa dữ liệu cảm biến và việc thu thập dữ liệu, điều này được thực hiện ở lớp thứ hai thông qua khuôn khổ Sensor Web Enablement, cụ thể là thành phần Sensor Observation Service. Kiến trúc này cũng tính đến việc tiết kiệm pin và mức tiêu thụ bộ nhớ cho thiết bị của người dùng, đạt được hiệu suất pin tốt nhờ sử dụng giao thức MQTT nhẹ. Việc phát hiện địa chấn cũng được xác thực bằng dữ liệu thực, cho thấy giải pháp này dự đoán được đỉnh địa chấn sớm hơn 12 giây.

Nền tảng MyShake là một khuôn khổ hoạt động có thể cung cấp hệ thống Cảnh báo Động đất (EW) bằng điện thoại thông minh do Allen và cộng sự phát triển [69] và đã hoạt động như một ứng dụng điện thoại từ năm 2016. Cảnh báo có thể được tạo bằng cách phát hiện sóng p bằng các cảm biến được nhúng trong điện thoại thông minh của người dùng hoặc khai thác dữ liệu từ các mạng lưới địa chấn khu vực (ví dụ: hiện tại, ứng dụng đang nhận dữ liệu từ hệ thống ShakeAlert tại Hoa Kỳ). Mặc dù phương pháp tiếp cận điện thoại thông minh giúp việc triển khai mạng lưới trở nên rất dễ dàng, nhưng việc mô tả các thông số của trận động đất (vị trí, cường độ và thời gian xuất phát) phụ thuộc vào số lượng và phân bố địa lý của điện thoại có ứng dụng MyShake xung quanh sự kiện. Một mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) được nhúng trong ứng dụng điện thoại thông minh được sử dụng để phân biệt giữa chuyển động mặt đất giống động đất và chuyển động hàng ngày. Khi một sự kiện động đất được kích hoạt trên điện thoại, máy chủ MyShake sẽ tìm kiếm các cụm kích hoạt không gian-thời gian để xác nhận rằng một trận động đất đang diễn ra. Mặc dù ứng dụng có thể cung cấp khả năng phát hiện động đất, vị trí, ước tính cường độ và bản đồ rung lắc, nhưng nỗ lực hiện tại đang được thực hiện để cải thiện khả năng cảnh báo sớm của nó. Một nền tảng mô phỏng đã được tạo ra để kiểm tra khả năng cảnh báo sớm của hệ thống. Mô phỏng cho thấy một vấn đề có thể được cảnh báo 15,6 giây trước khi khu vực đông dân cư bị động đất ảnh hưởng, nhưng có 2,8 giây chậm trễ để chuyển tiếp

Cảnh báo từ máy chủ MyShake đến điện thoại di động, và hiện vẫn chưa rõ độ trễ này sẽ thay đổi như thế nào với số lượng lớn thiết bị trong bối cảnh thực tế. Cường độ dự đoán thấp hơn cường độ quan sát được. Phiên bản mới của ứng dụng MyShake2.0 sẽ phát và nhận cảnh báo động đất sớm, đồng thời cải thiện các tính năng tổng thể của ứng dụng.

Klapez et al. [67] đã bắt đầu phát triển một hệ thống cảnh báo động đất dựa trên đám mây, công suất thấp và chi phí thấp có tên là Earthcloud, sử dụng máy đo địa chấn thay vì máy đo gia tốc MEMS, khẳng định rằng chúng tạo ra ít tiếng ồn hơn ở tần số lấy mẫu thấp hơn. Khi phát hiện các biến thể trong chuyển động mặt đất, các cảm biến sẽ gửi dữ liệu đến máy chủ và cũng tạo ra cảnh báo đầu tiên nếu chuyển động đủ mạnh. Cụ thể, dữ liệu được đóng gói vào một gói MQTT và chuyển tiếp đến Amazon Web Services (AWS) IoT Core, nơi xử lý và sau đó gửi chúng đến Amazon Kinesis. Amazon Kinesis được sử dụng để xử lý trước nhưng cũng để chuyển tiếp dữ liệu theo thời gian thực đến cả các thiết bị được kết nối (sẽ nhận được cảnh báo xác nhận thứ hai hoặc cảnh báo đầu tiên nếu ban đầu các cảm biến không tự kích hoạt bất kỳ cảnh báo nào) và Amazon S3, một dịch vụ lưu trữ dữ liệu. Giải pháp được phát triển đã được thử nghiệm bằng cách sử dụng mạng ba đơn vị tại thành phố Modena, Ý và chỉ có một trong ba cảm biến không phát hiện ra sự kiện động đất, trong khi những cảm biến khác thì thành công.

D'Errico và cộng sự [35] đề xuất kiến trúc của một hệ thống EW sử dụng mạng 5G để đạt được độ trễ thấp khi truyền dữ liệu từ WSN Giám sát Sức khỏe Cầu trúc đến máy chủ để xử lý dữ liệu. Bằng cách cung cấp một số dịch vụ với tài nguyên chuyên dụng ("phân chia mạng"), Radio Mới 5G có thể hỗ trợ các dịch vụ URLLC cho phép các thiết bị gửi dữ liệu với độ trễ dưới 1 ms và độ tin cậy cao. Mạng được Định nghĩa bằng Phần mềm, Ảo hóa Chức năng Mạng và Điện toán Biên Di động tiếp tục nâng cao hiệu suất bằng cách có thể phân bổ tài nguyên động cho từng dịch vụ và triển khai tài nguyên tính toán gần hơn với người dùng cuối.

Hung và cộng sự [70] cũng đã phát triển một hệ thống EW Động đất dựa trên SHM, nhưng tập trung vào hiệu quả năng lượng, vốn vẫn là một hạn chế quan trọng trong EW Động đất. Một nút canh gác đã được tích hợp vào đơn vị cổng của WSN sử dụng tiêu chuẩn IEEE 802.15.4.

Nút canh gác bao gồm một bộ dò sóng P, một bộ phát Wake-on Radio (WoR) và một radio thu dữ liệu. Các thiết bị WoR được gắn trên mỗi nút giám sát kênh để phát tín hiệu đánh thức, được sử dụng để giảm mức tiêu thụ năng lượng trong các pha Rendezvous, tức là khi bộ thu phải thức dậy khi một nút truyền ở lớp cao hơn bắt đầu giao tiếp. Việc sử dụng các thiết bị WoR cho phép bộ xử lý chính của mỗi nút chuyển hoàn toàn sang chế độ ngủ khi không cần truyền. Kiến trúc đề xuất bao gồm: (i) một cổng cảm biến dựa trên điểm truy cập 3G/Wi-Fi, (ii) một bộ dò sóng p được kết nối với cổng và (iii) các nút cảm biến không dây với các bộ thu WoR được tổ chức theo thứ bậc. Bộ dò sóng P kích hoạt hệ thống WSN đáng tin cậy và chính xác hơn thông qua các thiết bị WoR khi phát hiện thấy sóng P. Nghiên cứu cho thấy độ trễ 229 ms đối với lệnh đánh thức, nhưng sơ đồ đề xuất có độ trễ đánh thức ngắn hơn và tiết kiệm năng lượng hơn (với mức tiêu thụ điện năng là 350  $\mu$ A) so với IEEE 802.15.4 (có mức tiêu thụ điện năng ở chế độ beacon từ 1,43 mA đến 2,51 mA, tùy thuộc vào các thông số được thiết lập).

## 5.2. Kiến trúc IoT cho Hệ thống EW Động đất

Bảng 4 tóm tắt các công nghệ được sử dụng trên từng lớp của kiến trúc tham chiếu cho các trường hợp sử dụng Earthquake EW đã được xem xét.

Bảng 4. Các công nghệ và giải pháp được sử dụng cho từng lớp trong các bài báo được đánh giá liên quan đến EW động đất.

Lớp nhận thức bài viết		Giao tiếp Lớp	Lớp ứng dụng và lớp cạnh	Cạnh/Sương mù Máy tính
[53]	Máy đo độ nghiêng	CANopen	Thuật toán SWEDA (P-Wave tại chỗ phát hiện)	Đúng.
[62]	Trạm GPS, máy đo địa chấn Không xác định		Bộ phân loại học máy ở cả cảm biến và cấp máy chủ trung tâm	Đúng.
[63]	Máy đo địa chấn	Mô hình dựa trên TDMA	Đa trạm dựa trên tương quan chéo thuật toán để xác định tâm chấn	KHÔNG.
[64]	Máy đo gia tốc MEMS	Ethernet, 3G/4G	Thuật toán phát hiện và xử lý sóng P tại máy chủ từ xa	KHÔNG.
[65]	Máy đo gia tốc MEMS	3G/4G	Thuật toán phát hiện và xử lý sóng P tại máy chủ từ xa; Shake Maps thời gian thực tính toán	KHÔNG.
[67]	Địa chấn kế	Ethernet	Giải pháp dựa trên nền tảng đám mây dựa trên AWS IoT cho xử lý lưu trữ dữ liệu và P-Wave phát hiện	KHÔNG.
[68]	Cảm biến MEMS trên điện thoại thông minh, Mô-đun GPS.	Wi-Fi, 2G/3G/4G	Ứng dụng điện thoại thông minh có phân loại thuật toán; Dự đoán học máy thuật toán tại máy chủ trung tâm	Đúng.
[69]	Cảm biến MEMS trên điện thoại thông minh	Wi-Fi, 3G/4G	Ứng dụng điện thoại thông minh dựa trên ANN thuật toán phát hiện; EW dựa trên cụm thuật toán tại máy chủ trung tâm	Đúng.
[35]	Sợi quang, MEMS và cảm biến áp điện.	Đài phát thanh MBUS 169 MHz, 5G	Nút canh gác dựa trên ngưỡng; dựa trên SHM giám sát sự kiện	Đúng.
[70]	Cảm biến SHM, P-Wave Máy dò.	Chuẩn IEEE 802.15.4, 3G/Wi-Fi	Nút tại chỗ của máy dò sóng P; dựa trên SHM giám sát sự kiện	Đúng.

Hầu hết các hệ thống được xem xét đều theo dõi chuyển động của mặt đất để phát hiện động đất và Vì vậy, máy đo gia tốc là loại cảm biến được sử dụng rộng rãi nhất. Các phương pháp khác như sử dụng GPS dữ liệu dịch chuyển cũng có thể hữu ích cho việc theo dõi thời gian thực và cảnh báo sớm [6]. Hệ thống giám sát sức khỏe kết cấu sử dụng cảm biến MEMS để đo chuyển động của tòa nhà cũng có thể được sử dụng làm nguồn dữ liệu để đánh giá chuyển động mặt đất và tác động của nó lên các tòa nhà với giá cả phải chăng [71,72]. Cảm biến MEMS được phân phối rộng rãi và giá rẻ các giải pháp và, trong khi chất lượng dữ liệu mà chúng cung cấp kém chính xác hơn so với dữ liệu địa chấn chuyên dụng các thiết bị, chúng có thể được sử dụng để thu thập một lượng lớn dữ liệu từ nhiều nguồn khác nhau và chúng cho phép đưa ra dự đoán với quá trình xử lý và điều kiện dữ liệu phù hợp. Vì mật độ dày đặc hơn mạng lưới đã chứng minh là hiệu quả hơn trong việc dự đoán động đất, sử dụng cảm biến MEMS có thể là một tài sản có giá trị để có thể lắp đặt thêm nhiều cảm biến trong khi vẫn giữ chi phí thấp.

Các giải pháp được xem xét sử dụng cả giao thức tầm ngắn như Wi-Fi và tầm xa giao thức di động, trong khi một số giải pháp cũng sử dụng các giải pháp truyền thông cục bộ có dây (Ethernet), mặc dù truyền thông không dây đã được chứng minh là hiệu quả nhất trong trường hợp khẩn cấp [38]. Với sự ra đời của 5G, thông tin liên lạc có thể được cải thiện hơn nữa được cải thiện và các dịch vụ URLLC đáp ứng hai yêu cầu chính của Earthquake EW, độ trễ và độ tin cậy của dữ liệu. Động đất có thể gây thiệt hại đặc biệt cho cơ sở hạ tầng mạng, cắt đứt toàn bộ khu vực khỏi mạng lưới truyền thông và gây khó khăn cho gửi dữ liệu từ mạng cảm biến không dây, cũng có thể bị hư hại do động đất chính nó. Hơn nữa, lưu lượng mạng thường tăng lên sau một trận động đất, đòi hỏi các nhà điều hành phải sử dụng các chương trình để xử lý tình trạng tắc nghẽn và lưu lượng giao thông cao. Truyền thông vệ tinh cung cấp phạm vi phủ sóng rộng và không bị ảnh hưởng bởi thảm họa mặt đất, do đó họ có thể đảm bảo tốt truyền thông trong trường hợp tê liệt mạng lưới truyền thông chính [28].

Khi nói đến thuật toán phát hiện và xử lý dữ liệu, phát hiện sóng P thường là phương pháp dễ triển khai nhất. Hơn nữa, nó cho phép chạy các thuật toán phát hiện động đất trên các thiết bị hạn chế bộ nhớ để tạo ra các hệ thống cảnh báo tại chỗ và triển khai các giải pháp Edge nhanh hơn. Nên sử dụng các thuật toán nhanh để tránh làm tăng độ trễ xử lý dữ liệu cho hệ thống.

Các phương pháp tại chỗ hữu ích để phát hiện động đất gần vùng sinh địa chấn [66]. Đặc biệt, các thuật toán STA/LTA đặc biệt phù hợp cho việc giám sát thời gian thực và cảnh báo sớm, nhất là khi các thiết bị có bộ nhớ hoặc sức mạnh xử lý hạn chế [73]. Các phương pháp khác như Học máy cũng có thể được sử dụng hiệu quả. So với các trường hợp sử dụng khác được xem xét trong bài viết này, các bài báo về Earthquake EW đã sử dụng nhiều hơn các giải pháp Edge, vốn rất cần thiết để giảm độ trễ của hệ thống xuống mức tối thiểu, ví dụ như cho phép các nút phát hiện động đất và gửi cảnh báo mà không cần xử lý dữ liệu chuyển động mặt đất tại máy chủ trung tâm hoặc Đám mây, nơi dữ liệu vẫn có thể được sử dụng để ước tính chính xác hơn sau này mà không làm giảm tốc độ cảnh báo tổng thể. Hơn nữa, việc sử dụng phương pháp Điện toán biên, đặc biệt là phương pháp phân tán như hệ thống được đề xuất trong [62], có thể hữu ích để tránh các sự cố phát sinh từ sự cố mất mạng trong các trận động đất lớn bằng cách phân phối khả năng phát hiện động đất trên nhiều thiết bị khác nhau được phân tán trên lãnh thổ.

### 5.3. Yêu cầu và ràng buộc hệ thống đối với hệ thống EW động đất

Do hoạt động địa chấn vừa phải trên khắp châu Âu, trọng tâm và yêu cầu chính đối với Hệ thống Cảnh báo Động đất Châu Âu (EW) là tốc độ hơn là đặc điểm nguồn, mặc dù nghiên cứu về khía cạnh này đang ngày càng tăng [6]. Trong khi đó, độ trễ thấp (về cả xử lý dữ liệu, thuật toán dự đoán được lựa chọn và truyền dữ liệu) luôn phải là trọng tâm để đưa ra cảnh báo trước khi sự kiện động đất chính xảy ra. Đặc biệt, độ trễ dữ liệu thường là yếu tố quan trọng nhất góp phần gây ra độ trễ của hệ thống EW Động đất [60], và do đó, định dạng gói hóa, phương pháp tuần tự hóa và nén dữ liệu, cấu trúc của mạng lưới địa chấn và bộ ghi dữ liệu, v.v., cần được tối ưu hóa.

Hệ thống EW động đất thường có những hạn chế về độ chính xác trong dự đoán và phát hiện, điều này có thể dẫn đến cả báo động giả và cảnh báo bị bỏ lỡ. Ngưỡng cảnh báo thấp hơn ngưỡng gây thiệt hại (hoặc nhiều ngưỡng) sẽ tạo ra nhiều báo động giả hơn, nhưng sẽ giảm thiểu số cảnh báo bị bỏ lỡ và thiệt hại có thể xảy ra cho người dùng [74].

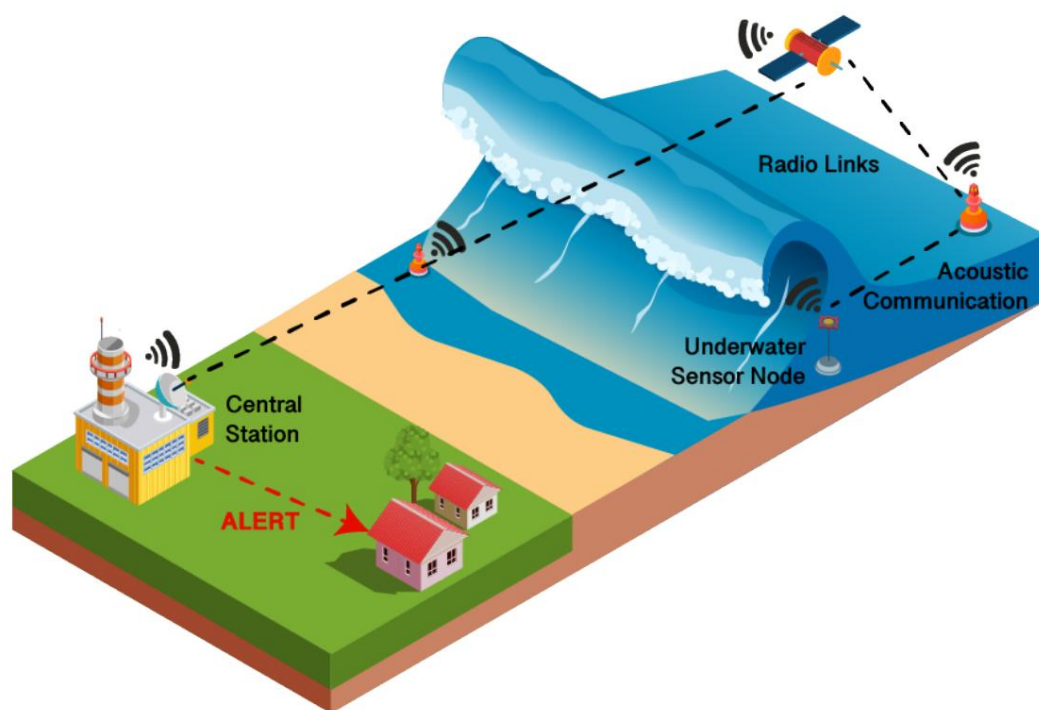
Các khía cạnh khác được làm sáng tỏ từ các bài báo đã được xem xét là: (i) vai trò thiết yếu của đồng bộ hóa và nhu cầu tiếp theo đối với các giao thức đồng bộ hóa trong các WSN được triển khai; (ii) nhu cầu về mạng cảm biến chịu lỗi; (iii) mối tương quan giữa mật độ nút và hiệu suất, cả về chất lượng dự đoán và khả năng phục hồi, vì WSN cho thấy ít bị hỏng dữ liệu hơn sau khi một số nút bị lỗi [63]. Nhiều nỗ lực trong các tài liệu đã được xem xét tập trung vào việc thiết kế các mạng cảm biến chi phí thấp có thể cho phép triển khai dày đặc hơn các mạng địa chấn về mặt này. Mật độ cũng đóng một yếu tố trong độ trễ tổng thể của hệ thống [60]. Cần xem xét tính dự phòng cho cả thiết bị và kênh truyền thông trong khi vẫn duy trì chi phí thấp [67] và cải thiện tuổi thọ pin cũng nên là một mục tiêu. Vì độ trễ là một yêu cầu rất cần thiết, nên điện toán Sương mù/Biên có thể được khai thác để giảm truyền dữ liệu và thời gian tính toán tại máy chủ chính, ví dụ như những các mô hình Học máy hoặc thuật toán dự đoán vào các thiết bị cảm biến hoặc cổng để đưa ra dự đoán đầu tiên trên lớp thấp hơn.

### 6. Sóng thần

Sóng thần là những đợt sóng lớn trong một vùng nước được tạo ra bởi các sự kiện khác nhau, chẳng hạn như động đất, núi lửa phun trào, lở đất tác động lên mặt nước, hoặc các vụ nổ dưới nước. Dự báo sóng thần bao gồm việc phát hiện các sự kiện địa chấn, đo mực nước biển và sóng gió. Các phương pháp khác cũng có thể được sử dụng trong hệ thống EW sóng thần, chẳng hạn như đo sóng thủy âm, đo áp suất hoặc phương pháp sử dụng camera. Trong trường hợp sóng thần do các sự kiện địa chấn gây ra, cảnh báo ban đầu có thể được đưa ra bằng cách đo động đất, để xác định tâm chấn và đưa ra dự đoán về sóng thần.

thời điểm đến, sau đó các phép đo khác có thể diễn ra, chẳng hạn như phát hiện sóng thủy âm [75]: động đất hoặc nói chung hơn là các chuyển động ở đáy biển, tạo ra sóng thủy âm lan truyền với tốc độ âm thanh trong nước (1500 m/giây) và do tốc độ lan truyền của chúng nhanh hơn nhiều so với sóng bề mặt nên chúng có thể được sử dụng để dự đoán sóng thần bằng cách triển khai các cảm biến âm thanh dưới nước. Tương tự như vậy, các cảm biến áp suất dưới nước cũng đã được sử dụng rộng rãi để phát hiện sóng thần [76].

Nhìn chung, Mạng cảm biến không dây dưới nước có thể được sử dụng để thu thập và ghi lại dữ liệu từ các thiết lập địa lý rộng lớn và chuyển tiếp đến một trung tâm để xử lý dữ liệu và tạo ra EW. UWSN được sử dụng cho nhiều ứng dụng và Internet vạn vật dưới nước (IoUT) là một mô hình cho phép phát hiện và dự đoán các sự kiện có thể dẫn đến thảm họa. Một UWSN thường bao gồm các thành phần sau: (i) các nút tĩnh hoặc di động dưới nước được trang bị các đơn vị cảm biến và modem âm thanh; và (ii) các nút chìm (trên các phương tiện mặt nước tự hành, phao hoặc tàu) được trang bị modem âm thanh và vô tuyến [77], được sử dụng để thu thập dữ liệu từ các cảm biến dưới nước và chuyển tiếp đến một máy chủ từ xa hoặc trung tâm giám sát, thường thông qua mạng IP [78]. Việc sử dụng modem âm thanh thay vì các đơn vị vô tuyến thường là lựa chọn tốt hơn do các điều kiện lan truyền trong môi trường dưới nước. Hình 4 minh họa một triển khai chung của Hệ thống cảnh báo sớm sóng thần dưới nước dựa trên kiến trúc UWSN cơ bản đã đề cập ở trên.



Hình 4. Ví dụ về việc triển khai Hệ thống cảnh báo sớm sóng thần dựa trên IoT và cảm biến dưới nước.

#### 6.1. Các trường hợp sử dụng được đánh giá cho Tsunami EW

Bảng 5 bao gồm các bài viết đã được đánh giá về hệ thống EW Sóng thần, bao gồm cả các giải pháp được đề xuất hoặc đã được thử nghiệm và các phương pháp để đánh giá và tối ưu hóa việc triển khai cảm biến, đặc biệt là đối với các giải pháp dưới nước quan trọng hơn. Các hệ thống và thiết kế không phải UWSN cũng được đánh giá.



Bảng 5. Các bài báo được đánh giá trong Tsunami EW.

Bài báo	Tập trung và Mục tiêu	Kết quả
[79]	Nghiên cứu tập trung vào việc mô tả một liên kết truyền thông dưới nước để cảnh báo sớm sóng thần	Đường truyền được thử nghiệm cho thấy độ tin cậy cao với tốc độ dữ liệu 350 bps, trong khi tốc độ cao hơn, dù vẫn đạt được, vẫn mang lại kết nối kém tin cậy hơn. Độ trễ 1 giây của bộ thu cùng với tốc độ dữ liệu tốt giúp giải pháp này khả thi cho cảnh báo sóng thần theo thời gian thực.
[80]	Phương pháp xác định cấu hình mảng cảm biến ngoài khơi tối ưu cho cảnh báo sóng thần gần, cũng như về mặt chi phí triển khai.	Nghiên cứu đã chứng minh được rằng cấu hình 3 cảm biến có thể cung cấp ước tính chính xác. Nghiên cứu cũng làm nổi bật một số yếu tố ảnh hưởng đến dự đoán, chẳng hạn như độ sâu, thời gian đến và vị trí của các cảm biến.
[81]	Phương pháp dự báo sóng thần gần thời gian thực sử dụng mạng lưới S-Net. Mạng lưới này phân loại các cảm biến dựa trên khoảng cách của chúng đến vùng nâng và sau đó tính toán diện tích của vùng đó.	Kỹ thuật này đã được xác nhận thành công trên hai sự kiện sóng thần trước đó và chỉ mất 1 phút để chạy thuật toán phân loại và không quá 10 phút để ước tính khu vực nguồn sóng thần.
[82]	Đề xuất một khuôn khổ cho WSN để tạo ra hệ thống EW sóng thần phát hiện từ trường, hành vi động vật và những thay đổi về hành vi thủy triều và sử dụng mô hình ML.	Mô hình ML được thử nghiệm cho thấy những đặc điểm thú vị nhất về mặt dự đoán là sự thay đổi mực nước thủy triều và thay đổi mô hình di cư.
[83]	Đề xuất một hệ thống EW nhằm cải thiện hiệu suất của các hệ thống EW Tsunami hiện có, đặc biệt là về mặt chi phí và khả năng truyền thông bị hạn chế.	Các phương tiện được sản xuất có tính cơ động thấp và chế độ hoạt động chủ yếu thụ động, cho phép tiêu thụ điện năng thấp. Việc sử dụng truyền thông vệ tinh và các thiết bị ngoại tuyến sẽ cho phép hệ thống hoạt động bình thường ngay cả khi mất kết nối trong trường hợp thảm họa.
[84]	Thiết kế một thiết bị giám sát độ cao sóng sử dụng cảm biến siêu âm đặt trên mặt nước, ngay trên bờ. Khi mực nước dâng cao, mô-đun GSM cũng sẽ gửi tin nhắn SMS kèm theo cảnh báo.	Nguyên mẫu đã được thử nghiệm thành công nhưng cảm biến không thể hoạt động ở độ cao trên 3,19 độ so với nước biển và do đó cần phải lắp đặt cẩn thận.
[85]	Phát triển và triển khai hệ thống phao sử dụng các phép đo vị trí phao để theo dõi chuyển động của bề mặt biển, đồng thời gửi các dữ liệu khác như mực nước biển. Một hệ thống âm thanh cũng đã được triển khai để theo dõi chuyển động đáy đại dương.	Các thí nghiệm thực địa cho thấy độ chính xác đến từng centimet trong việc định vị phao. Một thí nghiệm cho thấy có những khoảng trống dữ liệu, có thể do độ nghiêng của phao làm giảm chất lượng liên lạc, dẫn đến việc triển khai một hệ thống để ổn định ăng-ten.
[86]	Thiết kế thiết bị IoT nổi để cảnh báo sớm và phát hiện sóng bất thường, sử dụng Logic mờ để dự đoán chính xác.	Thuật toán Logic mờ có độ chính xác cao (98% đến 100%) trong giai đoạn thử nghiệm. Giao tiếp LoRa cho thấy độ trễ 4,6279 giây và tỷ lệ lỗi tối thiểu.

Freitag et al. [79] đã thiết kế và thử nghiệm hiệu suất của một hệ thống âm thanh dưới nước để phát triển một EW sóng thần trường gần ở lưu vực Mentawai, giữa Tây Sumatra và Indonesia. Trong ứng dụng này, khoảng cách giữa các cảm biến (cảm biến áp suất) là lớn (hàng chục km) và khoảng cách đến bờ thậm chí còn lớn hơn, do đó tần số thấp hơn được sử dụng để liên lạc. Hệ thống được triển khai gần đây ở các độ cao khác nhau và với phạm vi thu sóng thay đổi. Đường truyền liên lạc đã chứng minh độ tin cậy cao với tốc độ dữ liệu 350 bps, cho thấy khả thi đối với một hệ thống cảnh báo sóng thần. Có thể đạt được tốc độ dữ liệu cao hơn nhưng chúng sẽ có độ tin cậy thấp hơn (có thể yêu cầu truyền lại các gói đã gửi). Độ trễ khoảng 1 giây, do đó thời gian cần thiết để dữ liệu có sẵn cho người dùng hoặc sẵn sàng để truyền đến một nút khác (trong cấu hình nhiều bước nhảy) là thời lượng của gói cộng với 1 giây, đây là kết quả tốt cho cảnh báo sớm trong bối cảnh này.

Nghiên cứu của Meza và cộng sự [80] trình bày một phương pháp xác định cấu hình mảng tối ưu của các cảm biến sóng thần ngoài khơi để cảnh báo sớm sóng thần gần. Phương pháp này đã được thử nghiệm ở Bắc Chile. Vấn đề chính với sóng thần gần là có một khoảng thời gian giữa lúc sóng thần hình thành và lúc sóng thần đổ bộ vào bờ khá ngắn, do đó việc xác định nguồn sóng thần kịp thời có thể gặp khó khăn. Chi phí cảm biến cũng có thể là một vấn đề, vì vậy nghiên cứu này muốn tìm ra số lượng cảm biến tối thiểu cho một hệ thống EW để đạt hiệu suất tối ưu.

Các yếu tố ảnh hưởng đến dự đoán bao gồm: vị trí của cảm biến so với chùm năng lượng sóng chính (song song hoặc vuông góc với mặt trận sóng); thời gian sóng áp suất đến cảm biến (cảm biến gần sự kiện hơn có thời gian quan sát ngắn hơn và do đó có ít dữ liệu hơn để dự đoán); độ sâu của cảm biến (phải đủ cao để bỏ qua các hiệu ứng phi tuyến tính); vị trí của các cảm biến so với nhau (mức độ chi tiết của mạng được chọn sao cho cao hơn bước sóng của sóng thần). Kết quả cho thấy cấu hình ba cảm biến có thể cung cấp ước tính chính xác về thời gian sóng thần đến và biên độ đỉnh của sóng đầu tiên.

Các trạm dưới nước quốc gia hoặc mạng lưới cảm biến hiện có (cả không dây và có dây) có thể được sử dụng để thu thập dữ liệu (ví dụ, về chuyển động đáy đại dương) và sử dụng dữ liệu đó để dự đoán và đưa ra cảnh báo. S-net là một mạng lưới quan sát dưới nước có cáp dày đặc được triển khai dọc theo rãnh Nhật Bản. Mạng lưới này bao gồm 150 đơn vị quan sát, bao gồm cả máy đo địa chấn và cảm biến áp suất đáy, được kết nối bằng cáp cách nhau 30 km. Tất cả dữ liệu đều đến bờ theo thời gian thực bằng cách sử dụng truyền thông cáp quang [87]. Inoue và cộng sự [81] đã phát triển một phương pháp dự báo sóng thần gần như thời gian thực bằng cách sử dụng dữ liệu mạng cảm biến S-Net, quan sát các dạng sóng thu được từ các cảm biến áp suất. Phương pháp này có thể phân loại các cảm biến của S-Net theo khoảng cách từ vùng nâng của trận động đất bằng cách quan sát các dạng sóng áp suất đã ghi nhận và bằng cách quan sát các cảm biến nào ở gần, bên ngoài hoặc xa vùng đó, phương pháp này có thể tính toán diện tích của vùng nâng. Kỹ thuật này có thể được sử dụng để ước tính cả vùng nguồn của sóng thần và cường độ động đất. Vì sóng động đất và sóng thủy âm cũng được mạng lưới phát hiện, nên cần phải lọc để chỉ thu được dữ liệu áp suất. Khung thời gian được xem xét để tính toán ước tính là khoảng 500 giây sau trận động đất đầu tiên, và chỉ cần 1 phút để phân loại các cảm biến, và khoảng 10 phút để tính toán diện tích nguồn sóng thần sau trận động đất, mà không cần các mô phỏng phức tạp. Kỹ thuật này đã được xác nhận thành công trên hai trận động đất lớn trước đó trong khu vực đó.

Jain và cộng sự [82] đề xuất một khuôn khổ và một thuật toán dự đoán cho Cảnh báo sớm sóng thần ở Thái Bình Dương để đo các loại thông số khác nhau bị ảnh hưởng bởi sóng thần và theo dõi hành vi của động vật hoang dã biển. Vì những thay đổi trong từ trường được tạo ra bởi sóng thần, nên các cảm biến từ có thể được sử dụng để phát hiện những thay đổi đó như là tiền thân của sóng thần; bản thân sóng thể hiện các mẫu dạng sóng cụ thể có thể được đo bằng Máy đo thủy triều; các cảm biến đếm và cảm biến chuyển động được sử dụng để theo dõi động vật hoang dã cũng bị ảnh hưởng bởi những thay đổi trong từ trường do sóng thần gây ra. Dữ liệu này sẽ được cảm nhận bởi một WSN trên đáy biển, sau đó được truyền đến một trạm gốc và sau đó được xử lý tại máy chủ chính. Các dự đoán được tính toán bằng Thuật toán học máy (cây mô hình logistic) và nghiên cứu đã chỉ ra rằng các đặc điểm có liên quan nhất cho dự đoán là những thay đổi về mực nước thủy triều và những thay đổi về mô hình di cư.

Gardner-Stephen et al. [83] đề xuất một mô hình cho Tsunami EW để cải thiện một số khía cạnh của các hệ thống cảnh báo hiện có, đặc biệt là về chi phí của giải pháp (có thể quá cao đối với một số quốc gia) và khả năng liên lạc trong các tình huống nguy hiểm. Giải pháp đề xuất bao gồm cả hệ thống EW (dựa trên các phương tiện ngầm tự hành), một nền tảng hoạt động như một "Hệ thống Hỗ trợ Quyết định Cảnh báo" và có thể hoạt động ngoại tuyến (khi các sự kiện thảm họa làm gián đoạn liên lạc internet tiêu chuẩn), và một hệ thống phân phối cảnh báo. Hệ thống EW sử dụng các phương tiện giá rẻ (do một trong các tác giả sản xuất và thiết kế) với đặc điểm là tính cơ động thấp, chế độ hoạt động chủ yếu thụ động với mức tiêu thụ điện năng rất thấp (1 Watt, cho phép hoạt động nhiều tuần trước khi sạc lại) và khả năng cảm nhận sóng thần từ xa bằng cách sử dụng cảm biến âm thanh (ống nghe dưới nước). Mạng lưới phương tiện cũng có thể phối hợp với các cảm biến sóng thần cố định truyền thống và được trang bị thiết bị GPS và kết nối vệ tinh.

Truyền thông vệ tinh cũng được sử dụng trong Hệ thống phân phối và hỗ trợ cảnh báo để phòng trường hợp các kết nối dựa trên IP tiêu chuẩn bị lỗi trong các sự kiện thảm khốc.

Mạng lưới cảm biến dưới nước không phải là giải pháp duy nhất có sẵn cho Tsunami EW. Adi et al. [84] đã thiết kế một thiết bị IoT để theo dõi chiều cao sóng bằng cách sử dụng sóng siêu âm

Cảm biến. Thiết bị được thiết kế để lắp đặt trên bờ biển, ngay trên mặt nước. Khi khoảng cách giữa cảm biến và mặt nước vượt quá một ngưỡng nhất định, mô-đun GSM gắn trên các thiết bị IoT sẽ gửi tin nhắn SMS kèm theo cảnh báo trước khi mực nước đạt đến mức nguy hiểm. Thiết bị cũng được trang bị một đèn báo âm thanh để cảnh báo những người ở gần. Nguyên mẫu đã được thử nghiệm thành công, nhưng cảm biến siêu âm không thể đọc bất kỳ dữ liệu mực nước nào nếu đặt ở khoảng cách cao hơn 3,19 m so với mặt nước biển, do đó cần có dữ liệu cụ thể về điều kiện nước biển trước khi lắp đặt.

Kato et al. [85] đã thiết kế một hệ thống vệ tinh phao để theo dõi đại dương và cảnh báo sớm sóng thần. Hệ thống được triển khai đầu tiên bao gồm một phao được trang bị ăng-ten Hệ thống vệ tinh định vị toàn cầu (GNSS) có khả năng truyền dữ liệu đến bờ biển trước khi sóng chạm tới. Dữ liệu nhận được (mực nước biển, vị trí phao) cho phép người dùng hình dung chuyển động của bề mặt biển tại các phao theo thời gian thực. Giải pháp này bắt đầu được phát triển vào năm 1997, với các lần triển khai tiếp theo vào các năm 2001-2003, 2004-2006 và 2011. Các giải pháp trước đó cho thấy rằng các phao được đặt cách bờ biển 20 km không cung cấp đủ thời gian để cảnh báo bờ biển và sơ tán. Chúng cũng cung cấp dữ liệu để giải quyết một số vấn đề quan trọng về thiết kế phao, với mục tiêu là mỗi phao tồn tại ít nhất 10 năm.

Vì khoảng cách phao cần thiết có thể vượt quá 100 km, nên thuật toán Định vị điểm chính xác được đề xuất để biết vị trí của phao dọc theo thông tin liên lạc vệ tinh.

Các thí nghiệm thực địa cho thấy độ chính xác định vị phao chỉ vài cm. Một thí nghiệm ban đầu cho thấy có những khoảng trống dữ liệu, có thể do độ nghiêng của phao làm giảm khả năng truyền tín hiệu, vì vậy một cơ chế ổn định ăng-ten đã được sử dụng trong các thí nghiệm tiếp theo. Bài báo cũng đề xuất sử dụng phao để đo chuyển động đáy đại dương, tuy độ chính xác thấp hơn các giải pháp như S-Net nhưng độ phân giải lại cao hơn. Thí nghiệm sử dụng ba bộ phát đáp đặt dưới đáy đại dương và giao tiếp với phao thông qua liên kết âm thanh. Việc đo chuyển động vỏ đại dương có thể được thực hiện bằng cách ước tính vị trí của các bộ phát đáp.

Darmawan và cộng sự [86] đã thiết kế một thiết bị IoT để tạo ra cảnh báo sớm khi phát hiện các bất thường trong hành vi sóng, sử dụng Logic Mờ để dự đoán chính xác. Nút cảm biến bao gồm một con quay hồi chuyển, một gia tốc kế và một mô-đun LoRa để truyền dữ liệu.

Cảm biến nổi trên biển, cảm nhận và xử lý dữ liệu để thu thập thông tin về chiều cao và tốc độ sóng. Hai thông số này sau đó được sử dụng để phân loại sóng bằng thuật toán Logic Mờ được tích hợp trong cảm biến. Dữ liệu cảm nhận được sau đó được gửi đến máy chủ bằng mô-đun LoRa. Thuật toán phân loại cung cấp cả nhãn nguy hiểm (an toàn, dự phòng, nguy hiểm) và mức độ nguy hiểm (giá trị từ 0 đến 100) bằng cách tính toán chiều cao và tốc độ sóng. Thuật toán Logic Mờ có độ chính xác từ 98% đến 100% trong giai đoạn thử nghiệm. Giao tiếp LoRa cũng đã được thử nghiệm, với độ trễ 4,6279 giây và tỷ lệ lỗi tối thiểu.

## 6.2. Kiến trúc IoT cho Hệ thống EW Sóng thần

Bảng 6 liệt kê các công nghệ chính được sử dụng trong tài liệu đánh giá Tsunami EW cho từng công nghệ lớp kiến trúc IoT tham chiếu.

Việc phát hiện độ cao và các bất thường của sóng trên mặt biển cũng có thể được sử dụng để phát hiện sớm sóng thần. Các phép đo sóng có thể được thực hiện từ các phao ngoài khơi, nhưng mặc dù rất chính xác, chúng cũng có thể rất tốn kém. Các cảm biến MEMS giá rẻ, công suất thấp, chẳng hạn như máy đo gia tốc và con quay hồi chuyển, cũng có thể được sử dụng để thu thập các đặc điểm của sóng như độ cao, chu kỳ, hướng và tốc độ bằng cách triển khai chúng trên các phao nổi.

Bảng 6. Các công nghệ và giải pháp được sử dụng cho từng lớp trong các bài báo được đánh giá về Tsunami EW.

Lớp nhận thức bài viết	Giao tiếp Lớp	Lớp ứng dụng và lớp cạnh	Cạnh/Sương mù Máy tính
[79]Cảm biến áp suất.	Âm học truyền thông.	Chưa được triển khai, mục tiêu là sử dụng mạng được tối ưu hóa để phát hiện theo thời gian thực.	KHÔNG.
[80]Phương pháp luận độc lập với loại cảm biến	Không xác định	Dự báo sóng thần dựa trên "Sự đảo ngược của phương pháp "Chiều cao bề mặt biển ban đầu" để xác định nguồn sóng thần	KHÔNG.
[81]Truyền thông quang học	Cảm biến áp suất.	Phân loại các nút cảm biến tại trung tâm máy chủ	KHÔNG.
[82]Cảm biến từ, máy đo thủy triều, đếm cảm biến và chuyển động cảm biến	GSM	Mô hình học máy tại máy chủ trung tâm	KHÔNG.
[83]Tự động dưới nước xe cộ	Tín hiệu âm thanh xử lý; Vệ tinh truyền thông	Nền tảng hỗ trợ quyết định cảnh báo có thể làm việc ngoại tuyến	KHÔNG
[84]Cảm biến siêu âm	GSM	Hệ thống báo động SMS dựa trên ngưỡng tại mức cảm biến	Đúng.
[85]Truyền thông vệ tinh	Hệ thống GNSS, cảm biến âm thanh	Tọa độ ước tính ở mức phao; phao xử lý và phổ biến dữ liệu tại trung tâm trạm; giao diện người dùng máy chủ web	KHÔNG.
[86]Con quay hồi chuyển, gia tốc kế	LoRa	Thuật toán logic mờ ở cấp độ cảm biến; dữ liệu xử lý và lưu trữ tại máy chủ trung tâm	Đúng.

Việc sử dụng mạng cảm biến trong môi trường dưới nước đi kèm với những thách thức liên quan đến lớp truyền thông. Do điều kiện khắc nghiệt hơn và liên quan chi phí cao hơn, nhưng cũng vì môi trường này đi kèm với các kịch bản lan truyền khiến liên lạc tần số vô tuyến khó sử dụng, kênh âm thanh được ưu tiên so với liên lạc vô tuyến [76,78], với tốc độ dữ liệu điển hình từ 31 kbps đến 125 kbps [88], hoặc thậm chí lên đến 300 kbps trong giải pháp của Freitag [79]. Truyền thông quang học cũng là một giải pháp và chúng cung cấp khả năng truyền thông nhanh hơn, năng lượng thấp với độ trễ thấp hơn, nhưng chúng yêu cầu tầm nhìn thẳng không giống như cảm biến âm thanh. Một số mạng lưới cảm biến dưới nước hiện có, chẳng hạn như S-Net ở Nhật Bản, sử dụng truyền thông quang có dây. Truyền thông được sử dụng nhiều nhất Lựa chọn cho các giải pháp không dây dưới nước chắc chắn là kênh âm thanh. Các bài báo đã được đánh giá sử dụng UWSN không xử lý các thông tin liên lạc 'trên đất liền', thường được thực hiện bởi một mạng IP như mạng di động. Chỉ [83] mới tính đến khả năng của các thông tin liên lạc trên mặt đất bị hỏng trong trường hợp thảm họa, và như vậy đã xem xét việc sử dụng Truyền thông vệ tinh để xử lý sự kiện đó. Truyền thông vệ tinh cũng đặc biệt phù hợp để phủ sóng khoảng cách lớn cần thiết trong một số giải pháp. Các giải pháp như LoRa và GSM cũng đã được sử dụng cho các thiết bị cảnh báo sóng thần.

Hầu hết các TEW dựa trên UWSN đều sử dụng kiến trúc cơ bản sử dụng máy chủ trung tâm được kết nối với các nút chìm thông qua mạng IP. Do đó, hoạt động tính toán chính là được thực hiện tại máy chủ nói trên và có nhiều phương pháp khác nhau để phát hiện sóng thần và điểm của nó nguồn gốc (đảo ngược, Học máy, phân loại cảm biến dưới nước, v.v.). Không phải UWSN hệ thống cũng có thể sử dụng các phương pháp ngưỡng đơn giản hoặc các thuật toán khác như Fuzzy Thuật toán logic được phát triển bởi [86]. Các hệ thống tương đối đơn giản này cũng cho phép di chuyển dự đoán ở rìa mạng và gần khu vực được giám sát hơn, giúp đưa ra cảnh báo nhanh hơn.

6.3. Yêu cầu và hạn chế của hệ thống đối với hệ thống EW sóng thần

Mạng lưới âm thanh dưới nước cần phải vừa đáng tin cậy vừa tiết kiệm năng lượng. Cần phải ước tính chính xác ngân sách năng lượng/tuổi thọ vì việc thay thế cảm biến là rất quan trọng. khó khăn hơn, và các kỹ thuật thu năng lượng (thu chuyển động sóng, nhiên liệu vi sinh tế bào [89]) được đề xuất để tăng cường tuổi thọ của các cảm biến được triển khai dưới nước [78].

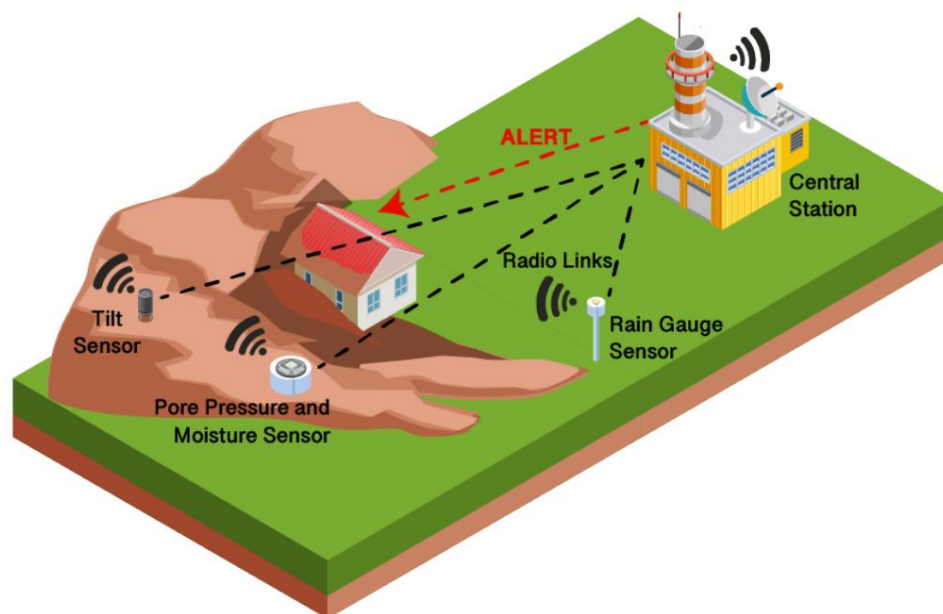
Việc đặt cảm biến đúng vị trí có thể giúp giảm chi phí và tăng độ chính xác của dự đoán. Vị trí của trung tâm và các máy thu mặt đất cũng quan trọng vì chúng có thể bị ảnh hưởng bởi động đất hoặc sóng thần [85].

Mặc dù kênh âm thanh là giải pháp tốt hơn cho UWSN so với kênh vô tuyến, nhưng nó cũng đi kèm với những hạn chế riêng: suy giảm phụ thuộc vào tần số, đa đường và độ trễ cao và thay đổi. Các lược đồ điều chế cụ thể cũng được đề xuất cho kênh âm thanh để tăng cường thông tin liên lạc tổng thể và giảm hiệu ứng đa đường [89]. Các giao thức định tuyến cũng đóng một vai trò thiết yếu trong UWSN vì thông tin liên lạc âm thanh tiêu tốn rất nhiều năng lượng và do đó chúng yêu cầu định tuyến được tối ưu hóa năng lượng, điều này thường đạt được bằng cái giá phải trả là độ trễ cao hơn [78]. Trong IoT, việc tổng hợp dữ liệu trở nên khó khăn hơn do thực tế là sự chồng chéo của nhiều đường định tuyến sẽ làm tăng xung đột gói tin trong khu vực và sẽ yêu cầu truyền lại, tăng mức tiêu thụ năng lượng và giảm độ tin cậy [76]. Khi sử dụng các nút cảm biến di động, chẳng hạn như phương tiện dưới nước hoặc tàu lượn biển, những thách thức tiếp theo về mặt định tuyến, định vị và đồng bộ hóa nút cũng như mức tiêu thụ năng lượng sẽ được đưa vào [78].

Giống như đối với UWSN, các giải pháp phao để phát hiện sóng gặp phải những thách thức so với việc triển khai trên đất liền, vì khả năng kết nối giữa các nút lân cận có thể bị ảnh hưởng bởi chiều cao của sóng và do đó cần có các giao thức định tuyến và thuật toán xử lý chuyên dụng [90], và độ nghiêng của phao cũng có thể làm giảm chất lượng liên lạc.

## 7. Lở đất

Trượt đất là một sự kiện nguy hiểm thường xuyên bao gồm sự di chuyển xuống dốc của đất, đá và vật liệu hữu cơ. Có nhiều yếu tố kích hoạt khác nhau đối với trượt đất, chẳng hạn như lượng mưa và thay đổi mực nước ngầm, tuyết tan nhanh hoặc động đất, do đó có thể theo dõi các đại lượng khác nhau để phát hiện và dự đoán trượt đất, chủ yếu là sự dịch chuyển nhưng cũng có các thông số thời tiết trong trượt đất do mưa gây ra [18]. Hệ thống EW trượt đất có thể được triển khai ở các quy mô khác nhau (khu vực, quốc gia hoặc quy mô địa phương hơn) và các hệ thống dựa trên IoT và MEMS có thể được sử dụng để giảm chi phí và cho phép lắp đặt các mạng cảm biến dày đặc hơn. Mưa thường là một yếu tố kích hoạt trượt đất và do đó, việc tích hợp dữ liệu thời tiết có sẵn hoặc dự báo thời tiết với dữ liệu thu được bằng cách sử dụng các cảm biến tại chỗ là rất hữu ích. Hình 5 minh họa một ví dụ về việc triển khai Hệ thống cảnh báo sớm về trượt đất đối với trượt đất do mưa gây ra.



Hình 5. Ví dụ về việc triển khai Hệ thống cảnh báo sớm sạt lở đất dựa trên IoT và cảm biến dưới nước.

7.1. Các trường hợp sử dụng được đánh giá cho Landslide EW

Bảng 7 tóm tắt các bài viết được đánh giá cho Cảnh báo sớm về lở đất, trong khi bài đánh giá chi tiết hơn được đưa ra bên dưới.

Bảng 7. Các bài báo được đánh giá trong Landslide EW.

Bài báo	Tập trung và Mục tiêu	Kết quả
[91]	Phát triển và thử nghiệm hệ thống EW lở đất dựa trên ngưỡng sử dụng kết hợp cấu trúc cây và cấu trúc sao để đạt được sự cân bằng tốt giữa mức tiêu thụ năng lượng và độ tin cậy.	Hệ thống đã được triển khai và cho thấy khả năng tiết kiệm điện năng tốt hơn so với các công trình trước đây nhờ cấu trúc mạng hỗn hợp và khả năng chuyển đổi cảm biến giữa chế độ cảnh báo và chế độ bình thường. LoRa được đề xuất sử dụng cho giao tiếp tầm xa thay vì Zigbee nếu cần. Hệ thống cần được khảo sát địa kỹ thuật để xác định ngưỡng.
[92]	Phát triển hệ thống cảnh báo lở đất sử dụng cảm biến nghiêng MEMS và cảm biến nước, tập trung vào việc tránh báo động giả thông qua các thông số tại chỗ.	Hệ thống đã được thử nghiệm và các cảm biến độ nghiêng đã thành công trong việc theo dõi giám sát mặt đất chậm đối với EW; người ta quan sát thấy rằng các biến thể độ nghiêng không phải lúc nào cũng liên quan đến lượng mưa và các điều kiện địa điểm cục bộ nên được được xem xét bên cạnh ngưỡng dựa trên lượng mưa.
[93]	Thiết kế các nút cảm biến LoRa giá rẻ để sử dụng cùng với các cảm biến giám sát mặt đất truyền thống hơn. Một trạm trung tâm thu thập dữ liệu từ mạng LoRa và các cảm biến khác , sau đó gửi đến giải pháp đám mây Inform@Risk, nơi xử lý dữ liệu để tạo báo động.	Các cảm biến giá rẻ được phát triển có thể cho phép xây dựng một mạng lưới cảm biến rộng hơn và linh hoạt hơn. Tuy nhiên, một vấn đề của hệ thống này là nó có thể không phát hiện được các vụ lở đất nhỏ hoặc đưa ra cảnh báo nếu không có biến dạng bề mặt đáng kể, vì đây là một hệ thống nông. Một hệ thống lớn hơn với 130 cảm biến sẽ sớm được thử nghiệm tại Colombia.
[94]	Hệ thống cảnh báo sạt lở đất dựa trên camera sử dụng thuật toán xử lý hình ảnh đơn giản có thể triển khai tại chỗ để hạn chế việc truyền hình ảnh.	Hệ thống được phát triển có thể gửi cảnh báo đến ứng dụng đã phát triển 5-6 giây sau khi phát hiện sự kiện để cảnh báo người dùng.
[21]	Phát triển hệ thống cảnh báo dựa trên học máy và phân tích kiến trúc EW cảnh báo sạt lở đất để cải thiện hiệu suất và độ tin cậy. Các dự đoán được thu thập từ hai thuật toán: thuật toán dự báo hiện tại và thuật toán dự báo.	Thuật toán dự báo hiện tại có độ chính xác 95% trong điều kiện thực tế và là giải pháp hợp lý trong trường hợp dữ liệu bị lỗi thu thập hoặc truyền tải. Thuật toán dự báo cũng được triển khai cho phép tăng thêm thời gian cảnh báo sớm khi dữ liệu cảm biến có sẵn.
[95]	Đề xuất về kiến trúc AI Edge nhằm hạn chế việc truyền dữ liệu tới Đám mây và lượng dữ liệu được truyền trên mạng thông qua việc xử lý dữ liệu cảm biến trong cụm Edge cục bộ	Độ trễ mạng giảm từ 208 ms xuống 53 ms và mức tiêu thụ băng thông từ 2,63 Mbps xuống 249,5 kbps, nhưng quá trình xử lý dữ liệu kéo dài tới 12 giây.
[96]	Đề xuất giải pháp cảnh báo sớm về điện toán biên cho phép các nút biên chạy mô hình ML tại chỗ.	Hệ thống tăng độ tin cậy bằng cách làm cho các dự đoán của Edge Nodes độc lập với Đám mây, nhưng các Edge Nodes đã phát triển không thể tự đào tạo các mô hình.
[97]	Phát triển hệ thống EW lở đất 5G có chức năng theo dõi lượng mưa, vết nứt đất và biến dạng bề mặt theo thời gian thực, đồng thời đưa ra cảnh báo dựa trên biến dạng mái dốc và cung cấp các kênh truyền thông khác để đảm bảo độ tin cậy.	Hệ thống truyền thông được triển khai cho phép truyền dẫn lên đến 100 km và bao gồm các kênh dự phòng. Hệ thống có khả năng tạo ra cả giao diện người dùng và cảnh báo.

Quốc và cộng sự [91] đã phát triển và thử nghiệm một Hệ thống cảnh báo sớm dựa trên WSN cho các trận lở đất sử dụng cảm biến độ ẩm đất, máy đo gia tốc và cảm biến áp suất nước lỗ rỗng (PWP). Để tìm ra sự cân bằng tốt giữa khả năng chịu lỗi và tiết kiệm pin, mạng cảm biến sử dụng kết hợp cấu trúc cây và cấu trúc sao. Vì cấu trúc cây giúp giảm mức tiêu thụ năng lượng nhưng dễ bị lỗi hơn do lỗi nút cụm (ví dụ, trong sự kiện lở đất), nên cấu trúc sao cũng được sử dụng trong đó các nút gửi dữ liệu trực tiếp đến nút thu. Khi độ dốc không được coi là ở trạng thái an toàn thì mạng sẽ chuyển sang cấu trúc sao; nếu không, mạng sẽ sử dụng cấu trúc cây trong đó các nút cụm gửi dữ liệu đến nút thu được đặt ở vị trí an toàn. Bài báo cũng đưa ra

để đồng bộ hóa và định tuyến cho mạng. Dữ liệu từ các cảm biến được thu thập bởi một nút thu thập và sau đó được gửi đến trạm trung tâm để phân tích, tạo cảnh báo và đưa ra quyết định về cấu trúc mạng, tùy thuộc vào trạng thái của lỗi đất. Trạm trung tâm sử dụng hệ thống dựa trên ngưỡng để xác định mức cảnh báo bằng cách sử dụng dữ liệu từ cả trạm đo mưa và mạng WSN.

Việc xác định ngưỡng phù hợp cho Hệ thống Cảnh báo Sớm Lỗi đất không phải lúc nào cũng dễ dàng, ngay cả khi có sẵn dữ liệu lịch sử. Abraham và cộng sự [92] đã phát triển một hệ thống Cảnh báo Sớm Lỗi đất ở dãy Himalaya dựa trên các cảm biến độ nghiêng MEMS và cảm biến nước được nhúng trong đất. Họ cũng nghiên cứu mối tương quan giữa lượng mưa và điều kiện tại chỗ để có được ngưỡng tốt hơn và tránh báo động giả. Hệ thống giám sát mà họ phát triển bao gồm sáu thiết bị giá rẻ, mỗi thiết bị được trang bị ăng-ten để gửi các phép đo đến một bộ ghi dữ liệu đặt gần các nút cảm biến, với khoảng thời gian nghỉ 10 phút sau mỗi lần truyền. Các cảm biến độ nghiêng có thể đo được sự dịch chuyển chậm của mặt đất, cho thấy chúng có khả năng dự đoán các sự cố. Chúng cũng cho thấy lượng mưa không phải lúc nào cũng tương quan trực tiếp với các biến động độ nghiêng và cần xem xét cả lượng mưa ngắn hạn và dài hạn để xây dựng ngưỡng khu vực.

Gamperl và cộng sự [93] đã phát triển một hệ thống dựa trên MEMS sử dụng LoRa để giao tiếp. Lớp dưới cùng của hệ thống EW Lỗi đất bao gồm: (i) một mạng LoRa đa cảm biến với ba loại nút cảm biến và ít nhất hai Cổng LoRa phục vụ cho mỗi nút để dự phòng; và (ii) một Hệ thống Giám sát Cắt Liên tục, các thiết bị đo áp suất và thiết bị đo độ giãn dài, đòi hỏi nhiều không gian hơn và khó lắp đặt hơn so với các nút LoRa.

Do đó, các nút LoRa được sử dụng để bao phủ một khu vực rộng lớn và giám sát nhiều thông số môi trường với chi phí thấp hơn. Một trạm trung tâm thu thập dữ liệu từ các nút LoRa và các hệ thống khác, sau đó chuyển tiếp đến máy chủ đám mây trung tâm có tên là Inform@Risk.

Đám mây quản lý và kết hợp dữ liệu từ nhiều cảm biến khác nhau để đưa ra Cảnh báo sớm và mức độ nguy hiểm dựa trên các ngưỡng hiện vẫn đang được xác định.

Cảnh báo được đưa ra thông qua một ứng dụng và còi báo động được cài đặt tại chỗ, nhưng báo động chỉ được gửi ngay lập tức khi có ít nhất hai nút lân cận hiển thị gia tốc mạnh cùng lúc và thuật toán phân tích dữ liệu đã được chạy; nếu không, một chuyên gia sẽ được giao nhiệm vụ kiểm soát dữ liệu để ngăn chặn báo động giả.

Aggarwal và cộng sự [94] đã đề xuất một hệ thống EW cảnh báo lỗi đất sử dụng camera để phát hiện chuyển động. Họ sử dụng một thuật toán phát hiện chuyển động khá đơn giản để có thể triển khai trên Raspberry Pi được kết nối với camera để phát hiện lỗi đất tại chỗ. Bằng cách này, các tín hiệu truyền tải chỉ liên quan đến hình ảnh tương ứng với sự kiện lỗi đất được phát hiện. Bài báo không nêu rõ phương thức truyền thông ưu tiên. Họ cũng đã triển khai lưu trữ dữ liệu sự kiện trên cơ sở dữ liệu đám mây có thể truy cập thông qua ứng dụng người dùng.

Thirugnanam và cộng sự [21] đã phát triển một hệ thống EW lỗi đất sử dụng ML để dự đoán, và họ cũng phân tích các yếu tố khác nhau để nâng cao độ tin cậy của hệ thống. Họ chia hệ thống thành năm thành phần chính: (i) thu thập dữ liệu, (ii) truyền dữ liệu, (iii) dự báo, (iv) cảnh báo và (v) phản ứng. Bằng cách sử dụng các thuật toán Học máy trong hệ thống, họ có thể thu được kết quả tốt ngay cả khi hai lớp đầu tiên bị lỗi và họ cũng nhấn mạnh rằng không phải tất cả các hệ thống EW lỗi đất hiện tại đều tính đến việc cải thiện độ tin cậy của việc truyền dữ liệu hoặc thêm dự phòng. Họ xem xét hai loại dự đoán: "dự báo ngay bây giờ", sử dụng thông tin dự báo lượng mưa thay vì dữ liệu cảm biến để vẫn có thể đưa ra dự đoán khi thông tin liên lạc hoặc cảm biến bị lỗi; dự báo, cung cấp thêm thời gian dẫn cho cảnh báo sớm trong thành phần thứ tư bằng cách sử dụng dữ liệu trong hai thành phần đầu tiên khi có sẵn.

Elmoulat và cộng sự [95] đã đề xuất một kiến trúc AI Edge cho EW Lỗi đất, có thể giảm đáng kể độ trễ của hệ thống bằng cách thực hiện huấn luyện mô hình ML ở biên mạng IoT. Mạng bao gồm hai loại nút LoRa ( nút Thời tiết và nút Mặt đất [98]) được kết nối với một cổng, giao tiếp với cụm AI Edge được liên kết với giải pháp Đám mây để lưu trữ và xử lý thêm bằng sức mạnh tính toán bổ sung. So với phương pháp chỉ sử dụng Đám mây, giải pháp được phát triển cho phép giảm độ trễ, mức tiêu thụ năng lượng thông tin và lượng dữ liệu được truyền tải, mặc dù



Toàn bộ kiến trúc vẫn chưa được thử nghiệm với một sự kiện thực tế. Một cải tiến nữa [99] là đưa Học tập Liên bang vào hệ thống, đây là phương pháp học tập phân tán cho các nút Edge/Fog cho phép liên tục cải thiện việc học ở cấp độ này và với các tài nguyên nút khác nhau.

Một giải pháp Edge khác là giải pháp của Joshi và cộng sự [96], người đã đề xuất một kiến trúc có tên là Reliable LEWS. Mục tiêu của kiến trúc này là duy trì hoạt động của hệ thống ngay cả khi kết nối với máy chủ Đám mây bị gián đoạn bằng cách triển khai các nút Edge có khả năng chạy mô hình ML được tạo và huấn luyện trên Đám mây. Mặc dù các nút Edge trong giải pháp này không thể tự huấn luyện các mô hình ML, nhưng chúng vẫn có thể đưa ra dự đoán khi kết nối với Đám mây bị ngắt bằng cách sử dụng mô hình đã huấn luyện trước đó và dữ liệu từ các nút cảm biến, giao tiếp với các nút Edge thông qua Wi-Fi.

Nghiên cứu của Li và cộng sự [97] đã phát triển một hệ thống EW ở đất 5G tại Trung Quốc, có khả năng theo dõi lượng mưa, vết nứt đất và biến dạng bề mặt theo thời gian thực. Giải pháp của họ sử dụng hai chế độ truyền dữ liệu bổ sung: (i) chế độ lưới, giúp tăng cường khả năng chịu lỗi và độ tin cậy, và (ii) chế độ tuyến tính, cho phép truyền thông tầm xa hiệu quả hơn. Hệ thống cũng cải thiện độ tin cậy của dữ liệu bằng cách sử dụng giao tiếp kép chế độ cation với mô-đun vệ tinh BeiDou và GPRS để truyền dữ liệu. Dữ liệu

Dữ liệu từ các trạm GNSS (dùng để theo dõi dịch chuyển bề mặt), các trạm giám sát mặt đất và các trạm thời tiết được truyền liên tục đến máy chủ trung tâm. Họ cũng phát triển một giao diện web cho phép trực quan hóa và giám sát dữ liệu theo thời gian thực. Có bốn mức cảnh báo được lựa chọn dựa trên góc tiếp tuyến của biến dạng mái dốc.

7.2. Kiến trúc IoT cho hệ thống EW ở đất

Bảng 8 báo cáo các công nghệ chính được sử dụng và phát triển cho từng lớp của kiến trúc IoT EW tham chiếu.

Như đã đề cập, có nhiều yếu tố khác nhau có thể góp phần gây ra lở đất, và do đó có thể sử dụng các cảm biến khác nhau để phát hiện chúng, và các thông số phù hợp cần theo dõi và tốc độ lấy mẫu nên được lựa chọn cẩn thận [91]. Hệ thống MEMS có thể hữu ích để giảm chi phí lắp đặt và cảm biến độ nghiêng đặc biệt thú vị vì chúng không cần phải được lắp sâu trong đất như máy đo độ nghiêng và chúng yêu cầu ít chuyên môn hơn về lắp đặt so với máy đo độ giãn dài [92]. Vì có thể cần phải theo dõi các khu vực rộng lớn, nên vị trí đặt cảm biến cần được đánh giá cẩn thận và dựa trên phân tích rủi ro đã thực hiện trước đó [93]. Lượng mưa thường là yếu tố kích hoạt chính gây ra lở đất [92], do đó, dữ liệu lịch sử lượng mưa, nếu có, và phép đo của nó thông qua các trạm thời tiết hoặc hệ thống radar nên được tích hợp trong một hệ thống như vậy.

Một số bài báo được đánh giá không nêu rõ các giao thức truyền thông được sử dụng, cũng như không có kế hoạch dự phòng trong trường hợp xảy ra lỗi truyền dữ liệu, mặc dù nhiều bài báo đã nhấn mạnh tầm quan trọng của việc tính đến các sự cố mạng có thể xảy ra và lập kế hoạch phù hợp. Việc sử dụng các công nghệ mới như 5G có thể cải thiện độ tin cậy, phạm vi phủ sóng và tốc độ dữ liệu.

Nhiều cơ chế Cảnh báo Sớm về lở đất dựa trên các ngưỡng có thể thu được từ cả mô hình thực nghiệm và xác suất [18], và chúng cần được tối ưu hóa để tránh gây ra báo động giả. Khi nói đến hệ thống Cảnh báo Sớm Lở đất, hầu hết các giải pháp đều áp dụng phương pháp xử lý dữ liệu dựa trên Đám mây hoặc máy chủ trung tâm và không xử lý dữ liệu trực tiếp ở cấp cảm biến hoặc cổng, nhưng các bài báo gần đây hơn như [95,96] đã bắt đầu tích hợp các giải pháp Biên vào hệ thống Cảnh báo Sớm Lở đất của họ để giảm độ trễ và cũng để cung cấp độ tin cậy tốt hơn trong trường hợp kết nối với Đám mây bị lỗi.

Bảng 8. Công nghệ và giải pháp được sử dụng cho từng lớp của các bài báo được đánh giá về Landslide EW.

Lớp nhận thức bài viết	Giao tiếp Lớp	Lớp ứng dụng và lớp cạnh	Cạnh/Sương mù Máy tính
[91] Cảm biến PWP, máy đo gia tốc, cảm biến độ ẩm đất, trạm đo lượng mưa	Zigbee, GSM/GPRS	Cảnh báo dựa trên ngưỡng tại trạm trung tâm số	
[92] Cảm biến độ nghiêng, thể tích cảm biến hàm lượng nước	Không xác định truyền thông không dây	Tổng hợp dữ liệu vào bộ ghi dữ liệu cục bộ; xử lý và phân tích tại máy chủ từ xa	KHÔNG.
[93] Thiết bị giám sát cắt liên tục, máy đo áp suất và máy đo độ giãn dài, cảm biến độ nghiêng, cảm biến nước.	LoRa, GSM	Phân tích dữ liệu và cảnh báo dựa trên ngưỡng tại Cloud Server; báo động thông qua ứng dụng điện thoại thông minh và hệ thống âm thanh cục bộ	KHÔNG.
[94] Cảm biến máy ảnh	Không xác định	Phát hiện lở đất được thực hiện tại địa phương; lưu trữ hình ảnh vào cơ sở dữ liệu; báo động thông qua ứng dụng điện thoại thông minh	Đúng.
[21] Lượng mưa, áp lực nước lỗ rỗng cảm biến	Không xác định	và tin nhắn SMS. Phân tích dữ liệu tại máy chủ trung tâm; dự báo và đưa ra mô hình ML.	KHÔNG.
[95] Các nút thời tiết (nhiệt độ, độ ẩm, áp suất, lượng mưa, tốc độ gió), các nút mặt đất (GPS, độ ẩm đất, gia tốc kế, con quay hồi chuyển)	LoRa	Triển khai AI biên để dự đoán và giám sát; Máy chủ đám mây để lưu trữ và tăng cường sức mạnh xử lý	Đúng.
[96] Trạm GNSS cảm biến độ ẩm, áp suất lỗ rỗng và dịch	Wi-Fi, GSM	Đào tạo mô hình ML tại máy chủ đám mây; Dự đoán mô hình ML tại nút Edge.	Đúng.
[97] chuyển; trạm giám sát vết nứt mặt đất; trạm giám sát lượng mưa.	5G, GPRS	Nền tảng web để phân tích dữ liệu và đưa ra cảnh báo dựa trên biến dạng mái dốc	KHÔNG.

7.3. Yêu cầu và hạn chế hệ thống đối với hệ thống EW lở đất Tài

liệu được xem xét đã nêu bật các hạn chế và khía cạnh sau đây cần được xem xét khi phát triển giải pháp IoT EW lở đất: (i) tầm quan trọng của việc tránh báo động giả (ii) giảm thiểu chi phí, ví dụ như sử dụng cảm biến MEMS, điều này cũng làm giảm khó khăn trong việc lắp đặt; (iii) tối ưu hóa vị trí đặt cảm biến thông qua phân tích rủi ro, lựa chọn đúng tham số để giám sát và tốc độ lấy mẫu phù hợp cho từng cảm biến; (iv) hạn chế mức tiêu thụ pin; (v) tăng cường khả năng phục hồi trong trường hợp xảy ra các sự kiện cực đoan , cũng như đối với thông tin liên lạc thông qua dự phòng hoặc các phương pháp khác [21,93]; và (vi) lập kế hoạch cho sự cố đối với cả kênh truyền thông và thu thập dữ liệu.

Điều rất quan trọng là tránh báo động giả, ví dụ như tối ưu hóa ngưỡng hoặc xác định nhiều ngưỡng dựa trên các tham số khác nhau [21,91]. Gamperl và cộng sự cũng bổ sung triển vọng sử dụng các kỹ thuật hợp nhất dữ liệu để giảm thiểu tác động của sự can thiệp của con người lên các phép đo. Một số bài báo cũng cân nhắc việc yêu cầu các chuyên gia kiểm tra dữ liệu đã thu thập nếu mức cảnh báo không đủ cao để đưa ra báo động ngay lập tức.

Mức tiêu thụ pin có thể được giới hạn bằng cách sử dụng chế độ ngủ đơn giản giữa các lần truyền, đây là hoạt động tiêu tốn nhiều năng lượng nhất đối với một nút cảm biến, hoặc sử dụng cấu trúc mạng cho phép giảm số lần truyền cho mỗi nút.

Cuối cùng, các hệ thống lở đất có thể bị hư hại do các sự kiện mà chúng theo dõi và do đó, người ta nên lập kế hoạch phù hợp, ví dụ như đặt các nút bồn rửa xa hơn khu vực được theo dõi hoặc sử dụng nhiều hơn một cổng để phục vụ cho mỗi cảm biến hoặc lập kế hoạch cho giao tiếp dự phòng, vì lỗi ở mức thu thập hoặc truyền dữ liệu có thể khiến hệ thống không thể dự đoán các sự kiện nguy hiểm [21].

8. Đề xuất và công việc tương lai

Bảng 9 liệt kê một số giải pháp khả thi và các phương án được đề xuất để đáp ứng các yêu cầu đã được xác định trước đây cho Hệ thống Cảnh báo Sớm IoT, dựa trên các tài liệu đã được xem xét. Cần lưu ý rằng một số đề xuất này vẫn cần được lập kế hoạch cẩn thận trước khi triển khai cuối cùng, ví dụ như đánh giá ngân sách liên kết hoặc cường độ tín hiệu thu được khi sử dụng một giải pháp truyền thông cụ thể, hoặc đo lường mức tiêu thụ năng lượng.

Mặc dù các yêu cầu cho từng trường hợp sử dụng (lũ lụt, động đất, sóng thần, lở đất) rất khác nhau, ví dụ về độ trễ, bảng cho thấy cách các giải pháp Edge có thể được sử dụng để đáp ứng các nhu cầu khác nhau và do đó cần được xem xét trong quá trình phát triển hệ thống Cảnh báo sớm dựa trên IoT, bất kể ứng dụng cụ thể nào. Điện toán biên cũng có thể bao gồm việc triển khai AI tại biên của kiến trúc. Khi sử dụng ML, việc học trên Đám mây có thể không phải là giải pháp tốt nhất cho các địa điểm được giám sát rộng, các vị trí phân tán về mặt địa lý hoặc các điều kiện môi trường thay đổi nhanh chóng [95] và do đó, AI biên có thể được tích hợp vào kiến trúc, lưu ý đến thời gian xử lý bổ sung có thể tùy thuộc vào độ phức tạp của mô hình ML và tài nguyên của các thiết bị Biên. Bên cạnh ML, các thuật toán đơn giản hơn hoặc các phương pháp dựa trên ngưỡng cũng có thể được sử dụng tại chỗ nếu các thiết bị bị hạn chế về khả năng tính toán. Tóm lại, Điện toán đám mây không nên bị thay thế hoàn toàn bởi Điện toán biên, nhưng chúng nên hoạt động song song để cung cấp một hệ thống tổng thể tốt hơn.

Bảng 9. Các giải pháp được đề xuất cho từng hạn chế EW chính.

Yêu cầu	Khuyến nghị và giải pháp khả thi
Tiết kiệm pin	<ul style="list-style-type: none"><li>Sử dụng các thủ tục ngủ thông minh giữa các lần truyền, duy trì thời gian thức dậy và truyền ngắn [50,70] hoặc chuyển sang chế độ ngủ một cách linh hoạt dựa trên xác suất sự kiện xảy ra trong khu vực [26].</li><li>Chọn đúng cấu trúc mạng hoặc sử dụng nhiều cấu trúc mạng trong cùng một giải pháp [91].</li><li>Sử dụng các mô-đun thu thập năng lượng [49].</li><li>Phân biệt giữa chế độ hoạt động "bình thường" và chế độ "nguy hiểm" với mức lấy mẫu cao hơn tần số [49,91].</li><li>Sử dụng các triển khai Edge và cảnh báo tại chỗ để hạn chế lượng truyền tải lên mức cao hơn các lớp của kiến trúc EW [62,95].</li></ul>
Khả năng chịu lỗi	<ul style="list-style-type: none"><li>Sử dụng cấu trúc lưới và mạng tự sửa chữa/tự tổ chức [44,54].</li><li>Lập kế hoạch dự phòng trong truyền thông [93] hoặc cho các thiết bị đầu cuối vệ tinh không phải mặt đất hoặc truyền thông liên kết tione [83].</li><li>Sử dụng mật độ nút cao hơn, cũng để hạn chế sự hỏng hóc dự đoán từ các nút bị lỗi [63].</li><li>Triển khai các thủ tục "dự báo ngay bây giờ", nếu có thể cho trường hợp sử dụng đó [21].</li><li>Sử dụng các triển khai Edge để có thể đưa ra cảnh báo ngay cả khi kết nối với Đám mây bị ngắt [96] hoặc phân phối quá trình xử lý dữ liệu ở các địa điểm khác nhau [62].</li></ul>
Phạm vi phủ sóng	<ul style="list-style-type: none"><li>Sử dụng mạng ad hoc khi cơ sở hạ tầng di động hoặc thông tin liên lạc không hiệu quả [46,48].</li><li>Sử dụng thông tin liên lạc vệ tinh để tiếp cận các địa điểm khó khăn không được phục vụ bởi thông tin liên lạc di động [37].</li></ul>
Độ trễ	<ul style="list-style-type: none"><li>Tích hợp công nghệ 5G vào dự án, đặc biệt là các dịch vụ có độ trễ thấp [35].</li><li>Sử dụng các phương pháp tại chỗ và triển khai Edge để có thể hạn chế thời gian phản hồi trong thời gian quan trọng ứng dụng [39].</li></ul>

Hơn nữa, chúng tôi đưa ra các khuyến nghị sau đây cho công việc và nghiên cứu trong tương lai, đồng thời xem xét một số khoảng trống hoặc xu hướng được tìm thấy trong các tài liệu đã được đánh giá: • Tối ưu hóa cảm biến MEMS và mở rộng ứng dụng của chúng. Vì chi phí là một yếu tố quan trọng trong các hệ thống EW và IoT, chúng mang lại sự hỗ trợ quý giá trong việc giảm chi phí đồng thời cho phép xây dựng mạng lưới cảm biến dày đặc và các lợi ích liên quan. Cảm biến MEMS không cung cấp độ chính xác tương đương với các cảm biến "tiêu chuẩn" khác, nhưng chúng vẫn có thể được sử dụng hiệu quả trong EW, và việc nghiên cứu sâu hơn về thiết kế cảm biến và điều chỉnh tín hiệu cảm biến có thể giúp cải thiện hiệu suất của chúng.

- Chuyển sang các giải pháp di động mới như 5G hoặc NB-IoT, vì một số bài báo được đánh giá vẫn dựa trên GSM hoặc nói chung là các công nghệ di động cũ hơn. Việc sử dụng các giải pháp di động mới được thiết kế đặc biệt để hỗ trợ thiết bị IoT và giao tiếp máy với máy (như EC-GSM, NB-IoT hoặc LTE-M) có thể cung cấp vùng phủ sóng tốt hơn, tiết kiệm pin, tốc độ dữ liệu và hiệu suất độ trễ trong bối cảnh này.
- Sử dụng mạng không phải mặt đất và thông tin liên lạc vệ tinh. Vệ tinh không chỉ cho phép tiếp cận các vị trí xa về mặt địa lý và khắc phục vấn đề thiếu cơ sở hạ tầng trên mặt đất [37], mà chúng còn có thể cung cấp một nền tảng thiết yếu trong trường hợp thảm họa ảnh hưởng đến cơ sở hạ tầng thông tin liên lạc trên mặt đất.
- Tối ưu hóa các thuật toán dự đoán và tốc độ xử lý dữ liệu, đặc biệt đối với các trường hợp sử dụng như động đất. Phân tích dữ liệu có thể trở thành nút thắt cổ chai của hệ thống EW và độ trễ dữ liệu là thành phần chính của độ trễ EEW [60] và do đó, những nỗ lực như vậy nên tập trung vào việc giảm thiểu nó đối với các trường hợp sử dụng đặc biệt coi trọng tốc độ. Bên cạnh các thuật toán xử lý tín hiệu, định dạng gói hóa và tuần tự hóa dữ liệu cũng cần được đánh giá về tác động của chúng đến tốc độ hệ thống và những khía cạnh này cùng với các khía cạnh khác như quản lý ghi dữ liệu cần phải trở thành một phần của thiết kế hệ thống.
- Sử dụng mô hình và giám sát đa tham số để nâng cao độ chính xác của dự đoán, giảm báo động giả và tăng cường khả năng phục hồi của hệ thống nếu một số mô-đun thu thập dữ liệu gặp sự cố. Dự báo nước mưa, dữ liệu chuyển động mặt đất từ vệ tinh, ảnh vệ tinh và mạng lưới cảm biến mặt đất cung cấp dữ liệu có thể được sử dụng kết hợp để cung cấp các mô hình dự báo và tối ưu hóa ngưỡng tốt hơn. Một phương pháp tiếp cận ngữ nghĩa có thể giúp cải thiện hiệu suất của hệ thống với nhiều nguồn dữ liệu khác nhau [11].

## 9. Thảo luận

Bài đánh giá cho thấy giải pháp IoT trong bối cảnh Cảnh báo sớm có thể rất hiệu quả trong các nhiệm vụ thu thập dữ liệu, truyền tải và dự báo thảm họa, đồng thời vẫn duy trì hiệu quả về chi phí. Do đó, Mạng cảm biến không dây, giải pháp đám mây, Học máy và các thành phần khác của Internet vạn vật nên được sử dụng khi triển khai Hệ thống cảnh báo sớm hoặc tích hợp vào các hệ thống hiện có. Điều này sẽ cho phép sự hiện diện dày đặc hơn của các hệ thống cảnh báo trên lãnh thổ và do đó sẽ cung cấp các cảnh báo kịp thời và dữ liệu và công cụ cần thiết cho các cơ quan chức năng, đảm bảo lợi ích kinh tế và xã hội bằng cách giảm thiểu rủi ro liên quan đến các sự kiện thảm khốc. Hơn nữa, nhiều yêu cầu của hệ thống Cảnh báo sớm dựa trên IoT có thể được đáp ứng hoàn toàn hoặc một phần bằng cách áp dụng giải pháp Điện toán biên, có thể kết hợp với giải pháp Đám mây. Điều này sẽ đưa tài nguyên hệ thống đến gần hơn với các thiết bị đầu cuối của mạng với mục đích giảm độ trễ, số lần truyền và xử lý dữ liệu tại các máy chủ trung tâm. Bài đánh giá đã chỉ ra một số xu hướng hiện có liên quan đến vấn đề này, với các ví dụ về giải pháp Edge, dự đoán tại chỗ và triển khai AI Edge, cũng như các xu hướng công nghệ khác như việc áp dụng ngày càng thường xuyên các hệ thống MEMS giá rẻ và thuật toán dự đoán Học máy.

Bài viết cũng chỉ ra cách lựa chọn chính xác cấu trúc mạng, hoặc việc triển khai các giải pháp lưới và thích ứng, có thể hiệu quả trong việc đáp ứng các ràng buộc khác như vùng phủ sóng, độ tin cậy và quản lý pin. Việc lựa chọn giao thức truyền thông phù hợp cũng rất quan trọng, cả về mức tiêu thụ năng lượng lẫn phạm vi phủ sóng. Các giải pháp ad hoc như LoRa hoặc các giao thức không được cấp phép khác có thể hiệu quả ở những khu vực không có vùng phủ sóng di động tốt, nhưng trong trường hợp này, cần phải tính đến các giới hạn do tài nguyên vô tuyến dùng chung. Mạng lưới không phải mặt đất cũng là một lựa chọn thay thế quan trọng cần xem xét, vì chúng có thể cung cấp một nền tảng back-end đáng tin cậy hơn so với mạng lưới mặt đất, vốn dễ bị lỗi hơn trong trường hợp thiên tai, và nhìn chung có thể cung cấp vùng phủ sóng tốt hơn ở những khu vực không có cơ sở hạ tầng di động tốt.

Một số khoảng trống trong các tài liệu gần đây cũng được tìm thấy, đặc biệt là việc thiếu các giải pháp chịu lỗi, cả về mặt lỗi giao tiếp và nút cảm biến, và việc sử dụng các giải pháp không

các giao thức truyền thông hiện đại, ví dụ, một số giải pháp vẫn sử dụng công nghệ di động cũ như GSM.

Các khuyến nghị được đưa ra nhằm mục đích lấp đầy những khoảng trống này và đóng góp có ý nghĩa cho nghiên cứu trong tương lai về hệ thống EW, đặc biệt liên quan đến các chủ đề như giao tiếp độ trễ cực thấp, giám sát và kiểm soát các thông số môi trường theo thời gian thực, cảm biến chi phí rất thấp và mạng cảm biến mật độ cao. Hơn nữa, một khuyến nghị quan trọng khác liên quan đến những lợi ích tiềm năng của mạng cảm biến rộng rãi, vì mật độ không chỉ mang lại khả năng chịu lỗi tốt hơn mà còn cải thiện hiệu quả của các dự đoán và phát hiện sự kiện.

10. Kết luận

Bài viết này đã xem xét các bài báo liên quan đến đề xuất, phát triển, thử nghiệm và tối ưu hóa Hệ thống Cảnh báo Sớm cho thiên tai dựa trên Internet vạn vật (IoT). Cụ thể, bốn trường hợp sử dụng khác nhau đã được xem xét: lũ lụt, động đất, sóng thần và lở đất. Đối với cả bốn kịch bản, một kiến trúc ba lớp tham chiếu đã được sử dụng để ngoại suy tốt hơn các giải pháp IoT được áp dụng trong mỗi bài báo, đồng thời làm nổi bật các mục tiêu, kết quả cuối cùng và những hạn chế có thể có của từng công trình. Dựa trên các tài liệu đã được xem xét, kết quả cho thấy việc sử dụng điện toán Sương mù/Biên trong kiến trúc đã phát triển cho phép giảm độ trễ, số lượng truyền tải và xử lý dữ liệu. Một phát hiện khác là trong các hệ thống Cảnh báo Sớm dựa trên IoT mới, cần tập trung nhiều hơn vào khả năng chịu lỗi của các giải pháp được triển khai, xét về mạng lưới cảm biến và khả năng phục hồi truyền thông. Hơn nữa, cần xem xét một số khuyến nghị liên quan đến tối ưu hóa mức tiêu thụ pin, độ trễ, hiệu quả truyền thông và độ tin cậy để cải thiện các hệ thống hiện có hoặc cho các nghiên cứu trong tương lai.

Đóng góp của tác giả: Khái niệm hóa, ME, LP, AB và PP; phương pháp luận, LP, AB và PP; xác nhận, ME, LP, AB và PP; phân tích chính thức, ME, LP, AB, LS và PP; điều tra, ME, LP và LS; tài nguyên, ME; quản lý dữ liệu, LS; viết-chuẩn bị bản thảo gốc, ME, LP và LS; viết-xem xét và biên tập, ME, AB và LS; hình dung, ME và LS; giám sát, LP, AB và PP; quản lý dự án, PP; tìm kiếm nguồn tài trợ, PP. Tất cả tác giả đã đọc và đồng ý với phiên bản bản thảo đã xuất bản.

Nguồn tài trợ: Nghiên cứu này được tài trợ bởi dự án mang tên “STREAM-Phát triển chiến lược quản lý lũ lụt”, 2014-2020 Interreg VA, Chương trình CBC Ý-Croatia - Kêu gọi đề xuất năm 2019, Trục ưu tiên: An toàn và khả năng phục hồi - Mục tiêu cụ thể: Tăng cường an toàn cho khu vực Chương trình khởi thiên tai và thảm họa do con người gây ra, Mã số ứng dụng: 10249186.

Tuyên bố của Hội đồng đánh giá thể chế: Không áp dụng.

Tuyên bố đồng ý có thông tin: Không áp dụng.

Lời cảm ơn: Hình 2-5 được thiết kế bằng cách điều chỉnh các vectơ bởi vectorpocket và macrovector/Freeepik.

Xung đột lợi ích: Các tác giả tuyên bố không có xung đột lợi ích.

Viết tắt

Các chữ viết tắt sau đây được sử dụng trong bản thảo này:

-----	Trí tuệ nhân tạo
AWS	Dịch vụ web của Amazon
ANN	Mạng nơ-ron nhân tạo
BLE	Bluetooth năng lượng thấp
DL	Học sâu
DNN	Mạng lưới nơ-ron sâu
EC-GSM-IoT	Phạm vi phủ sóng mở rộng GSM IoT
EW	Cảnh báo sớm

EWS	Hệ thống cảnh báo sớm
GNSS	Hệ thống vệ tinh định vị toàn cầu
GPRS	Dịch vụ vô tuyến gói chung
GPS	Hệ thống định vị toàn cầu
GSM	Hệ thống thông tin di động toàn cầu
-----	Internet vạn vật
IoOUT	Internet vạn vật dưới nước
ISM	Công nghiệp, Khoa học và Y tế
Mạng diện rộng tầm xa	LoRaWAN
LPWAN	Mạng diện rộng công suất thấp
MCS	Cảm biến đám đông di động
MEMS	Hệ thống vi cơ điện tử
Máy tính	Học máy
MQTT	Vận chuyển hàng đợi tin nhắn từ xa
NB-IoT	Internet vạn vật băng hẹp
NLoS	Không nằm trong tầm nhìn
NTP	Giao thức thời gian mạng
PWP	Áp suất nước lỗ rỗng
SHM	Giám sát sức khỏe kết cấu
SVM	Máy vectơ hỗ trợ
Thuyết Điện	Thuật toán phát hiện sự kiện sóng địa chấn
TPSN	Giao thức đồng bộ hóa thời gian cho mạng cảm biến
URLLC	Truyền thông độ trễ thấp cực kỳ đáng tin cậy
UWSN	Mạng cảm biến không dây dưới nước
Thế giới	Wake-on-Radio
Mạng WSN	Mạng cảm biến không dây
6LoWPAN IPv6 qua Mạng cá nhân không dây công suất thấp	

Tài liệu tham khảo

1. Định nghĩa Hệ thống Cảnh báo Sớm của Văn phòng Giảm nhẹ Thiên tai Liên Hợp Quốc. Có sẵn trực tuyến: <https://www.undrr.org/ thuật ngữ/hệ thống cảnh báo sớm> (truy cập ngày 1 tháng 3 năm 2022).
2. Mulero Chaves, J.; De Cola, T. 1-Ứng dụng Cảnh báo Công cộng: Yêu cầu và Ví dụ. Trong Mạng An toàn Công cộng Không dây 3; Cámara, D., Nikaein, N., Biên tập; Elsevier: Amsterdam, Hà Lan, 2017; trang 1-18. [\[CrossRef\]](#)
3. Zambrano, AM; Calderón, X.; Jaramillo, S.; Zambrano, OM; Esteve, M.; Palau, C. 3-Hệ thống cảnh báo sớm của cộng đồng. Trong Mạng an toàn công cộng không dây 3; Cámara, D., Nikaein, N., Biên tập; Elsevier: Amsterdam, Hà Lan, 2017; trang 39-66. [\[CrossRef\]](#)
4. Khung hành động Sendai về Giảm thiểu Rủi ro Thiên tai. Có sẵn trực tuyến: <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework- disaster-risk-reduction-2015-2030> (truy cập ngày 1 tháng 3 năm 2022).
5. Sendai Framework Analytics về Mục tiêu G: Cảnh báo sớm và Thông tin Rủi ro. Có sẵn trực tuyến: <https://sendaimonitor.undrr.org/analytics/global-target/16/8> (truy cập ngày 1 tháng 3 năm 2022).
6. Allen, RM; Melgar, D. Cảnh báo sớm động đất: Những tiến bộ, thách thức khoa học và nhu cầu xã hội. Tạp chí Trái đất và Hành tinh. Khoa học. 2019, 47, 361-388. [\[CrossRef\]](#)
7. Strauss, J.; Allen, R. Lợi ích và Chi phí của Cảnh báo Động đất Sớm. Seismol. Res. Lett. 2016, 87, 765-772. [\[CrossRef\]](#)
8. Velazquez, O.; Pescaroli, G.; Cremen, G.; Galasso, C. Đánh giá các thành phần kỹ thuật và xã hội-tổ chức của Hệ thống Cảnh báo Động đất Sớm. Mặt trận. Khoa học Trái đất. 2020, 8, 445. [\[CrossRef\]](#)
9. Beltramone, L.; Gomes, RC Hệ thống Cảnh báo Sớm Động đất như một Công cụ Quản lý Rủi ro Tài sản. CivilEng 2021, 2, 120-133. [\[CrossRef\]](#)
10. Rogers, D.; Tsirkunov, V. Chi phí và lợi ích của hệ thống cảnh báo sớm. Glob. Assess. Rep. 2011. Có sẵn trực tuyến: <https://documents1.worldbank.org/curated/pt/609951468330279598/pdf/693580ESW0P1230aster0Risk0Reduction.pdf> (truy cập vào 18 tháng 1 năm 2022).
11. Poslad, S.; Middleton, SE; Chaves, F.; Tao, R.; Necmioglu, O.; Bügel, U. Một hệ thống cảnh báo sớm IoT ngữ nghĩa cho thiên nhiên Quản lý Khủng hoảng Môi trường. IEEE Trans. Emerg. Top. Comput. 2015, 3, 246-257. [\[CrossRef\]](#)
12. Rangra, A.; Sehgal, V. Quản lý thiên tai bằng mạng lưới vạn vật kết nối xã hội. Multimed. Ứng dụng Công cụ. 2022, 81, 1-15. [\[CrossRef\]](#)
13. Dorsemayne, B.; Gaulier, JP; Wary, JP; Kheir, N.; Urien, P. Internet vạn vật: Định nghĩa và phân loại. Trong Kỳ yếu của NGMAST 2015: Hội nghị quốc tế lần thứ 9 về Ứng dụng, Dịch vụ và Công nghệ di động thể hệ tiếp theo, Cambridge, Vương quốc Anh, 9-11 tháng 9 năm 2015; trang 72-77. [\[CrossRef\]](#)
14. Pierleoni, P.; Belli, A.; Palma, L.; Valenti, S.; Raggiunto, S.; Incipini, L.; Ceregioli, P. Nhà nguyện scrovegni tiến vào tương lai: Một giải pháp Internet vạn vật tiên tiến đã mang đến ánh sáng mới cho kiệt tác của Giotto. IEEE Sens. J. 2018, 18, 7681-7696. [\[CrossRef\]](#)

15. Qi, L.; Wang, Z.; Zhang, D.; Li, Y. Cơ chế Truyền tải Bảo mật và Cảnh báo Sớm cho Thông tin Cảm biến Thông minh trong Internet Vạn vật. *J. Sens.* **2022**, *2022*, 6199900. [\[CrossRef\]](#)
16. Manrique, JA; Rueda-Rueda, JS; Portocarrero, JMT: So sánh Internet vạn vật và Mạng cảm biến không dây từ góc nhìn tổng quan. Trong *Kỷ yếu Hội nghị Quốc tế IEEE 2016 về Internet vạn vật; IEEE Green Computing and Communications; IEEE Cyber, Physical, and Social Computing*, Thành Đô, Trung Quốc, 15-18 tháng 12 năm 2016; trang 252-257. [\[CrossRef\]](#)
17. Wanare, R.; Iyer, KKR; Jayanthi, P. Những tiến bộ gần đây trong hệ thống cảnh báo sớm dự báo sạt lở đất. Trong *Geohazard Giảm nhẹ*; Adhikari, BR, Kolathayar, S., Eds.; Springer: Singapore, 2022; trang 249-260.
18. Pecoraro, G.; Calvellido, M.; Piciullo, L. Chiến lược giám sát cho hệ thống cảnh báo sớm sạt lở đất tại địa phương. *Sạt lở đất* **2019**, *16*, 213-231. [\[CrossRef\]](#)
19. Mei, G.; Xu, N.; Qin, J.; Wang, B.; Qi, P. Khảo sát về Internet vạn vật (IoT) để phòng ngừa rủi ro địa chất: Ứng dụng, Công nghệ, và Thách thức. *IEEE Internet Things J.* **2020**, *7*, 4371-4386. [\[CrossRef\]](#)
20. Arshad, B.; Ogie, R.; Barthelemy, J.; Pradhan, B.; Verstaavel, N.; Perez, P. Thị giác máy tính và cảm biến dựa trên IoT trong giám sát và lập bản đồ lũ lụt: Tổng quan hệ thống. *Sensors* **2019**, *19*, 5012. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
21. Thirugnanam, H.; Ramesh, MV; Rangan, Phó chủ tịch Nâng cao độ tin cậy của hệ thống cảnh báo sớm lở đất bằng máy học. *Sạt lở đất năm 2020*, *17*, 2231-2246. [\[CrossRef\]](#)
22. Nimbargi, SR; Hadawale, S.; Ghodke, G. Hệ thống cảnh báo và phát hiện sóng thần sử dụng IoT: Một khảo sát. Trong *Kỷ yếu Hội nghị Quốc tế về Dữ liệu Lớn, IoT và Khoa học Dữ liệu (BID) năm 2017*, Pune, Ấn Độ, 20-22 tháng 12 năm 2017; trang 182-184. [\[CrossRef\]](#)
23. Acosta-Coll, M.; Ballester-Merelo, F.; Martinez-Peiró, M.; De la Hoz-Franco, E. Thiết kế hệ thống cảnh báo sớm thời gian thực cho phù sa Lũ quét—Một bài tổng quan. *Cảm biến* **2018**, *18*, 2255. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
24. Singh, K.; Singh Tomar, DD Kiến trúc, công nghệ hỗ trợ, bảo mật và quyền riêng tư, và ứng dụng của Internet vạn vật: Một khảo sát. Trong *Kỷ yếu Hội nghị Quốc tế về I-SMAC (IoT trong Mạng xã hội, Di động, Phân tích và Đám mây)*, I-SMAC 2018, Palladam, Ấn Độ, 30-31 tháng 8 năm 2018; trang 642-646. [\[CrossRef\]](#)
25. Basha, EA; Ravela, S.; Rus, D. Giám sát dựa trên mô hình để phát hiện lũ lụt cảnh báo sớm. Trong *Kỷ yếu Hội nghị SenSys'08— Kỷ yếu Hội nghị ACM lần thứ 6 về Hệ thống Cảm biến Mạng Nhúng*, Raleigh, NC, Hoa Kỳ, 5-7 tháng 11 năm 2008; trang 295-308. [\[CrossRef\]](#)
26. Sood, SK; Sandhu, R.; Singla, K.; Chang, V. IoT, dữ liệu lớn và khung quản lý lũ thông minh dựa trên HPC. *Bền vững. Tính toán. Thông tin. Hệ thống.* **2018**, *20*, 102-117. [\[CrossRef\]](#)
27. Ray, PP; Mukherjee, M.; Shu, L. Internet vạn vật cho quản lý thiên tai: Hiện trạng và triển vọng. *IEEE Access* **2017**, *5*, 18818-18835. [\[CrossRef\]](#)
28. Ran, Y. Những cân nhắc và đề xuất về việc cải thiện các biện pháp ứng phó thảm họa mạng lưới truyền thông sau trận động đất Văn Xuyên. *Tạp chí Cộng đồng IEEE*, **2011**, *49*, 44-47. [\[CrossRef\]](#)
29. Pierleoni, P.; Gentili, A.; Mercuri, M.; Belli, A.; Garellò, R.; Palma, L. Cải thiện hiệu suất của tin nhắn xác nhận nhận trong mạng lưới Bluetooth Mesh. *IEEE Internet Things J.* **2022**, *9*, 2056-2070. [\[CrossRef\]](#)
30. Popli, S.; Jha, RK; Jain, S. Khảo sát về Internet vạn vật băng hẹp tiết kiệm năng lượng (NB-IoT): Kiến trúc, Ứng dụng và Thách thức. *IEEE Access* **2019**, *7*, 16739-16776. [\[CrossRef\]](#)
31. Aju, OG Khảo sát công nghệ mạng cảm biến không dây ZigBee: Cấu trúc, ứng dụng và thách thức. *Int. J. Comput. Appl.* **2015**, *130*, 47-55. [\[Tham chiếu chéo\]](#)
32. Gomez, C.; Oller, J.; Paradelles, J. Tổng quan và đánh giá công nghệ Bluetooth năng lượng thấp: Một công nghệ không dây công suất thấp mới nổi. *Cảm biến* **2012**, *12*, 11734-11753. [\[CrossRef\]](#)
33. Mekki, K.; Bajic, E.; Chaxel, F.; Meyer, F. Nghiên cứu so sánh các công nghệ LPWAN để triển khai IoT quy mô lớn. *CNTT Express* **2019**, *5*, 1-7. [\[CrossRef\]](#)
34. Hwang, SH; Liu, SZ Khảo sát về công nghệ diện rộng công suất thấp 3GPP và ứng dụng của nó. Trong *Kỷ yếu Hội nghị Truyền thông Không dây Châu Á - Thái Bình Dương IEEE VTS 2019, APWCS 2019*, Singapore, 28-30 tháng 8 năm 2019. [\[CrossRef\]](#)
35. D'Errico, L.; Franchi, F.; Graziosi, F.; Marotta, A.; Rinaldi, C.; Boschi, M.; Colarieti, A. Giám sát sức khỏe kết cấu và cảnh báo sớm động đất trên mạng 5G. Trong *Kỷ yếu Diễn đàn Thế giới lần thứ 5 của IEEE về Internet vạn vật, WF-IoT 2019*, Limerick, Ireland, 15-18 tháng 4 năm 2019; trang 783-786. [\[CrossRef\]](#)
36. Ploennigs, J.; Rysseel, U.; Kabitzsch, K. Phân tích hiệu suất của giao thức mạng cảm biến không dây EnOcean. Trong *Kỷ yếu Hội nghị Quốc tế IEEE lần thứ 15 về Công nghệ Mới nổi và Tự động hóa Nhà máy, ETFA 2010*, Bilbao, Tây Ban Nha, 13-16 tháng 9 năm 2010. [\[CrossRef\]](#)
37. Centenaro, M.; Costa, CE; Granelli, F.; Sacchi, C.; Vangista, L. Khảo sát về công nghệ, tiêu chuẩn và những thách thức mở trong Vệ tinh IoT. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* **2021**, *23*, 1693-1720. [\[CrossRef\]](#)
38. Shah, SA; Seker, DZ; Hameed, S.; Draheim, D. Vai trò ngày càng tăng của phân tích dữ liệu lớn và IoT trong quản lý thảm họa: Những tiến bộ gần đây, phân loại và triển vọng. *IEEE Access* **2019**, *7*, 54595-54614. [\[CrossRef\]](#)
39. Hamdan, S.; Ayyash, M.; Almajali, S. Kiến trúc điện toán biên cho các ứng dụng Internet vạn vật: Một khảo sát. *Cảm biến* **2020**, *20*, 6441. [\[Tham chiếu chéo\]](#) [\[PubMed\]](#)
40. Pierleoni, P.; Concetti, R.; Belli, A.; Palma, L. Giải pháp của Amazon, Google và Microsoft cho IoT: Kiến trúc và so sánh hiệu suất. *IEEE Access* **2019**, *8*, 5455-5470. [\[CrossRef\]](#)



41. Tran, MN; Kim, Y. Hệ thống hỗ trợ ứng phó thảm họa dựa trên mạng dữ liệu được đặt tên trên cơ sở hạ tầng điện toán biên. *Điện tử* 2021, 10, 335. [\[CrossRef\]](#)
42. Mocnej, J.; Miškuf, M.; Papcun, P.; Zolotová, I. Tác động của mô hình điện toán biên đến mức tiêu thụ năng lượng trong IoT. *IFAC-PapersOnLine* 2018, 51, 162-167. [\[CrossRef\]](#)
43. Pereira, PR; Grilo, A.; Rocha, F.; Nunes, MS; Casaca, A.; Chaudet, C.; Almström, P.; Johansson, M. Độ tin cậy đầu cuối trong mạng cảm biến không dây: Những thách thức trong khảo sát và nghiên cứu. *Hội thảo EuroFGI về Kiểm soát lưu lượng IP QoS 2007*, 54, 67-74.
44. Furquim, G.; Filho, GPR; Jalali, R.; Pessin, G.; Pazzi, RW; Ueyama, J. Cách cải thiện khả năng chịu lỗi trong dự đoán thảm họa: A Nghiên cứu điển hình về lũ quét sử dụng IoT, ML và dữ liệu thực. *Cảm biến* 2018, 18, 907. [\[CrossRef\]](#)
45. Corral, C.; Berenguer, M.; Sempere-Torres, D.; Poletti, L.; Silvestro, F.; Rebora, N. So sánh hai hệ thống cảnh báo sớm để dự báo nguy cơ lũ quét khu vực. *J. Hydrol.* 2019, 572, 603-619. [\[CrossRef\]](#)
46. Jayashree, S.; Sarika, S.; Solai, AL; Prathibha, S. Một phương pháp mới để cảnh báo lũ sớm bằng Android và IoT. Trong *Kỷ yếu Hội nghị Quốc tế lần thứ 2 về Công nghệ Máy tính và Truyền thông năm 2017, ICCCT 2017, Chennai, Ấn Độ*, 23-24 tháng 2 năm 2017; trang 339-343. [\[CrossRef\]](#)
47. Ibarreche, J.; Aquino, R.; Edwards, RM; Rangel, V.; Pérez, tôi.; Martínez, M.; Castellanos, E.; Álvarez, E.; Jimenez, S.; Rentería, R.; và cộng sự. Hệ thống cảnh báo sớm lũ quét ở Colima, Mexico. *Cảm biến* 2020, 20, 5231. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
48. Nordin, R.; Mohamad, H.; Behjati, M.; Kelechi, AH; Ramli, N.; Ishizu, K.; Kojima, F.; Ismail, M.; Idris, M. Triển khai IoT bằng hợp đầu tiên trên thế giới để giám sát thủy văn nông thôn trong môi trường sinh quyển UNESCO. Trong *Kỷ yếu Hội nghị Quốc tế lần thứ 4 về Thiết bị Đo lường, Đo lường và Ứng dụng Thông minh (ICSIMA) của IEEE năm 2017, Putrajaya, Malaysia*, 28-30 tháng 11 năm 2017; trang 1-5. [\[CrossRef\]](#)
49. Purkovic, D.; Coates, L.; Honsch, M.; Lumbeck, D.; Schmidt, F. Hệ thống giám sát sông thông minh và phát hiện lũ sớm tại Nhật Bản được phát triển với công nghệ cảm biến tầm xa EnOcean. Trong *Kỷ yếu Hội thảo Quốc tế lần thứ 2 về Đo lường Lưới điện Thông minh năm 2019, SMAGRIMET 2019, Split, Croatia*, 9-12 tháng 4 năm 2019; trang 2-7. [\[CrossRef\]](#)
50. Ragnoli, M.; Barile, G.; Leoni, A.; Ferri, G. Hệ thống giám sát lũ lụt tự động công suất thấp dựa trên LoRa. *J. Điện tử công suất thấp. Appl.* 2020, 10, 15. [\[CrossRef\]](#)
51. Al Qundus, J.; Dabbour, K.; Gupta, S.; Meissonier, R.; Paschke, A. Mạng cảm biến không dây để phát hiện thảm họa lũ lụt dựa trên AI. *Ann. Oper. Res.* 2020, 1-23. [\[CrossRef\]](#)
52. Thekkil, TM; Prabakaran, N. Hệ thống giám sát và phát hiện lũ sớm dựa trên WSN thời gian thực. Trong *Kỷ yếu Hội nghị Quốc tế năm 2017 về Công nghệ Máy tính, Đo lường và Điều khiển Thông minh, ICICICT 2017, Kerala, Ấn Độ*, 6-7 tháng 7 năm 2017; tr. 1709-1713. [\[CrossRef\]](#)
53. Tariq, H.; Touati, F.; Al-Hitmi, MAE; Crescini, D.; Mnaouer, AB Một thuật toán phát hiện sự kiện địa chấn cảnh báo sớm theo thời gian thực sử dụng các nút đo độ nghiêng hai trục địa không gian thông minh cho các ứng dụng Công nghiệp 4.0. *Appl. Sci.* 2019, 9, 3650. [\[CrossRef\]](#)
54. Mitra, P.; Ray, R.; Chatterjee, R.; Basu, R.; Saha, P.; Raha, S.; Barman, R.; Patra, S.; Biswas, SS; Saha, S. Dự báo lũ lụt bằng Internet vạn vật và mạng nơ-ron nhân tạo. Trong *Kỷ yếu Hội nghị Công nghệ Thông tin, Điện tử và Truyền thông Di động thường niên lần thứ 7 của IEEE, IEEE IEMCON 2016, Vancouver, BC, Canada*, 13-15 tháng 10 năm 2016; trang 1-5. [\[CrossRef\]](#)
55. Anbarasan, M.; Muthu, BA; Sivaparthipan, CB; Sundarasekar, R.; Kadry, S.; Krishnamoorthy, S.; Samuel, DJ; Dasel, AA Hệ thống phát hiện thảm họa lũ lụt dựa trên IoT, dữ liệu lớn và mạng nơ-ron sâu tích chập. *Comput. Commun.* 2020, 150, 150-157. [\[CrossRef\]](#)
56. Sabbatini, L.; Palma, L.; Belli, A.; Sini, F.; Pierleoni, P. Hệ thống thị giác máy tính dành cho nhân viên đo lường trong giám sát lũ sông. *Phát minh* 2021, 6, 79. [\[CrossRef\]](#)
57. Adelantado, F.; Vilajosana, X.; Tuset-Peiro, P.; Martinez, B.; Melia-Segui, J.; Watteyne, T. Tìm hiểu các giới hạn của LoRaWAN. *Tạp chí Cộng đồng IEEE* 2017, 55, 34-40. [\[CrossRef\]](#)
58. Pillai, AS; Chandraprasad, GS; Khwaja, AS; Anpalagan, A. Kiến trúc IoT hướng dịch vụ cho công tác chuẩn bị ứng phó thảm họa và hệ thống dự báo. *Internet Things* 2019, 14, 100076. [\[CrossRef\]](#)
59. Alphonsa, A.; Ravi, G. Hệ thống cảnh báo sớm động đất bằng IoT sử dụng mạng cảm biến không dây. Trong *Kỷ yếu Hội nghị Quốc tế IEEE năm 2016 về Truyền thông Không dây, Xử lý Tín hiệu và Mạng, WiSPNET 2016, Chennai, Ấn Độ*, 23-25 tháng 3 năm 2016; trang 1201-1205. [\[CrossRef\]](#)
60. Behr, Y.; Clinton, J.; Kästli, P.; Cauzzi, C.; Racine, R.; Meier, M. Giải phẫu Cảnh báo Động đất Sớm (EEW): Dự đoán Độ trễ Thời gian cho Hệ thống EEW Đầu cuối. *Seismol. Res. Lett.* 2015, 86, 830-840. [\[CrossRef\]](#)
61. Clinton, J.; Zollo, A.; Marmureanu, A.; Zulfikar, C.; Parolai, S. Tình hình hiện tại và tương lai của cảnh báo sớm động đất ở Khu vực châu Âu. *Bull. Earthq. Eng.* 2016, 14, 2441-2458. [\[CrossRef\]](#)
62. Fauvel, K.; Balouek-Thomert, D.; Melgar, D.; Silva, P.; Simonet, A.; Antoniu, G.; Costan, A.; Masson, V.; Parashar, M.; Roderio, tôi.; và cộng sự. Phương pháp tiếp cận học máy đa cảm biến phân tán để cảnh báo sớm động đất. Trong *Kỷ yếu của Hội nghị AAAI về Trí tuệ nhân tạo, New York, NY, Hoa Kỳ*, ngày 7-12 tháng 2 năm 2020; trang 403-411. [\[Tham khảo chéo\]](#)
63. Khedo, KK; Bissessur, Y.; Goolaub, DS Hệ thống mạng cảm biến không dây nội địa để giám sát hoạt động địa chấn. *Tương lai Hệ thống máy tính chung* 2020, 105, 520-532. [\[CrossRef\]](#)
64. Fu, J.; Li, Z.; Meng, H.; Wang, J.; Shan, X. Đánh giá hiệu suất của các cảm biến địa chấn giá rẻ cho động đất dày đặc sớm Cảnh báo: Thử nghiệm thực địa 2018-2019 tại Tây Nam Trung Quốc. *Cảm biến* 2019, 19, 1999. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
65. Peng, C.; Jiang, P.; Chen, Q.; Ma, Q.; Yang, J. Đánh giá hiệu suất của một mảng cảm biến địa chấn MEMS dày đặc được triển khai tại khu vực biên giới Tứ Xuyên-Vân Nam để cảnh báo sớm động đất. *Micromachines* 2019, 19, 735. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)

66. Peng, C.; Chen, Y.; Chen, Q.; Yang, J.; Wang, H.; Zhu, X.; Xu, Z.; Zheng, Y. Một loại máy đo gia tốc ba trục mới với MEMS dải động để cảnh báo sớm động đất. *Comput. Geosci.* **2017**, *100*, 179–187. [\[CrossRef\]](#)
67. Klapez, M.; Grazia, CA; Zennaro, S.; Cozzani, M.; Casoni, M. Những trải nghiệm đầu tiên với Earthcloud, một hệ thống cảnh báo động đất IoT dựa trên đám mây giá rẻ. Trong *Kỷ yếu Hội nghị Quốc tế lần thứ 14 năm 2018 về Điện toán Không dây và Di động, Mạng và Truyền thông*, Limassol, Síp, 15–17 tháng 10 năm 2018; trang 262–269. [\[CrossRef\]](#)
68. Zambrano, AM; Perez, I.; Palau, C.; Esteve, M. Công nghệ Internet vạn vật ứng dụng vào cảnh báo sớm động đất Hệ thống. *Thế hệ tương lai. Hệ thống máy tính.* **2017**, *75*, 206–215. [\[CrossRef\]](#)
69. Allen, RM; Kong, Q.; Martin-Short, R. Nền tảng MyShake: Tầm nhìn toàn cầu về cảnh báo sớm động đất. *Pure Appl. Geophys.* **2020**, *177*, 1699–1712. [\[CrossRef\]](#)
70. Hung, SL; Ding, JT; Lu, YC Phát triển hệ thống giám sát tình trạng kết cấu dựa trên mạng cảm biến không dây, tiết kiệm năng lượng và có độ trễ thấp, sử dụng hệ thống cảnh báo sớm động đất tại chỗ và radio báo động. *Tạp chí Giám sát Sức khỏe Kết cấu Dân sự.* **2019**, *9*, 103–115. [\[CrossRef\]](#)
71. Valenti, S.; Conti, M.; Pierleoni, P.; Zappelli, L.; Belli, A.; Gara, F.; Carbonari, S.; Regni, M. Một nút cảm biến không dây giá rẻ để giám sát tòa nhà. Trong *Kỷ yếu Hội thảo IEEE 2018 về Hệ thống Giám sát Môi trường, Năng lượng và Kết cấu (EESMS)*, Salerno, Ý, 21–22 tháng 6 năm 2018; trang 1–6.
72. Pierleoni, P.; Marzorati, S.; Ladina, C.; Raggiunto, S.; Belli, A.; Palma, L.; Cattaneo, M.; Valenti, S. Đánh giá hiệu suất của một đơn vị cảm biến giá rẻ cho các ứng dụng địa chấn: Thử nghiệm thực địa trong các sự kiện địa chấn năm 2016–2017 tại miền Trung nước Ý. *IEEE Sens. J.* **2018**, *18*, 6644–6659. [\[Tham chiếu chéo\]](#)
73. Lomax, A.; Satriano, C.; Vassallo, M. Phát triển và tối ưu hóa bộ chọn tự động: Filterpicker—Một bộ chọn bằng thông rộng mạnh mẽ Bộ chọn dữ liệu để theo dõi địa chấn theo thời gian thực và cảnh báo sớm động đất. *Seismol. Res. Lett.* **2012**, *83*, 531–540. [\[CrossRef\]](#)
74. Minson, SE; Baltay, AS; Cochran, ES; Hanks, TC; Page, MT; McBride, SK; Milner, KR; Meier, MA: Giới hạn của độ chính xác cảnh báo sớm động đất và chiến lược cảnh báo tốt nhất. *Sci. Rep.* **2019**, *9*, 2478. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
75. Cecioni, C.; Bellotti, G.; Romano, A.; Abdolali, A.; Sammarco, P.; Franco, L. Hệ thống cảnh báo sớm sóng thần dựa trên các phép đo sóng thủy âm theo thời gian thực. *Procedia Eng.* **2014**, *70*, 311–320. [\[CrossRef\]](#)
76. Coutinho, RWL; Boukerche, A.; Vieira, LFM; Loureiro, M. Mạng cảm biến dưới nước của AAF để quản lý thảm họa thông minh. *Tạp chí Tiêu dùng Điện tử IEEE* **2020**, *9*, 107–114. [\[CrossRef\]](#)
77. Kao, CC; Lin, YS; Wu, GD; Huang, CJ Một nghiên cứu toàn diện về internet của các vật thể dưới nước: Ứng dụng, thách thức, và các mô hình kênh. *Cảm biến* **2017**, *17*, 1477. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
78. Fattah, S.; Gani, A.; Ahmedy, I.; Idris, MYI; Hashem, IAT Một cuộc khảo sát về mạng cảm biến không dây dưới nước: Yêu cầu, Phân loại học, những tiến bộ gần đây và những thách thức nghiên cứu mở. *Cảm biến* **2020**, *20*, 5393. [\[CrossRef\]](#)
79. Freitag, L.; Ball, K.; Koski, P.; Partan, J.; Singh, S.; Giaya, D. Truyền thông âm thanh cho mạng lưới cảm biến đại dương từ đáy đến đáy. Trong *Kỷ yếu Hội nghị OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston, OCEAN 2018, Charleston, SC, Hoa Kỳ*, 22–25 tháng 10 năm 2018; trang 8–12. [\[CrossRef\]](#)
80. Meza, J.; Catalán, PA; Tsushima, H. Một phương pháp luận để thiết kế tối ưu mạng lưới cảm biến giám sát sóng thần Nghịch đảo. *Nguy cơ tự nhiên. Khoa học Hệ thống Trái đất. Thảo luận.* **2018**, *1*–25. [\[CrossRef\]](#)
81. Inoue, M.; Tanioka, Y.; Yamanaka, Y. Phương pháp ước tính gần thời gian thực các nguồn sóng thần bằng cách sử dụng áp suất đáy đại dương mạng lưới cảm biến (S-net). *Khoa học Trái đất* **2019**, *9*, 310. [\[CrossRef\]](#)
82. Jain, N.; Virmani, D. Phân loại đặc điểm để dự đoán địa chấn dưới nước bằng cách sử dụng các nút cảm biến không dây. *Bài giảng. Ghi chú Kỹ thuật. Khoa học máy tính* **2017**, *2227*, 151–156.
83. Gardner-Stephen, P.; Wallace, A.; Hawtin, K.; Al-Nuaimi, G.; Tran, A.; Le Mozo, T.; Lloyd, M. Giảm chi phí đồng thời tăng hiệu quả phục hồi của các hệ thống cảnh báo sớm sóng thần. Trong *Kỷ yếu Hội nghị Công nghệ Nhân đạo Toàn cầu IEEE 2019, GHTC 2019, Seattle, WA, Hoa Kỳ*, 17–20 tháng 10 năm 2019; trang 1–8. [\[CrossRef\]](#)
84. Adi, P.; Prasetya, D.; Setiawan, A.; Nachrowie, N.; Arifuddin, R. Thiết kế dịch vụ tin nhắn phân loại dựa trên máy dò sóng thần sử dụng Arduino và SIM900A cho mô-đun GSM/GPRS. Trong *Kỷ yếu Hội nghị ICASI 2019, Banda Aceh, Indonesia, ngày 18 tháng 7 năm 2019.* [\[CrossRef\]](#)
85. Kato, T.; Terada, Y.; Tadokoro, K.; Kinugasa, N.; Futamura, A.; Toyoshima, M.; Yamamoto, SI; Ishii, M.; Tsugawa, T.; Nishioka, M.; và cộng sự. Phát triển phao GNSS cho hệ thống giám sát tai biến địa chất tổng hợp. *J. Thảm họa Res.* **2018**, *13*, 460–471. [\[Tham khảo chéo\]](#)
86. Darmawan, S.; Irawan, B.; Setianingsih, C.; Murty, MA Thiết kế thiết bị phát hiện sóng biển bằng thuật toán mờ dựa trên Internet vạn vật. Trong *Kỷ yếu Hội nghị Quốc tế IEEE 2020 về Công nghiệp 4.0, Trí tuệ Nhân tạo và Công nghệ Truyền thông, IAICT 2020, Bali, Indonesia, 7–8 tháng 7 năm 2020*; trang 75–80. [\[CrossRef\]](#)
87. Mochizuki, M.; Uehira, K.; Kanazawa, T.; Kunugi, T.; Shiomi, K.; Aoi, S.; Matsumoto, T.; Takahashi, N.; Chikasada, N.; Nakamura, T.; và cộng sự. Dự án S-net: Hiệu suất của mạng lưới quan sát đáy biển quy mô lớn nhằm phòng ngừa và giảm thiểu thảm họa động đất và sóng thần. Trong *Kỷ yếu Hội nghị OCEANS-MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans 2018, OCEANS, Kobe, Nhật Bản*, 28–31 tháng 5 năm 2018; trang 1–4. [\[CrossRef\]](#)
88. Haque, KF; Kabir, KH; Abdelgawad, A. Sự tiến bộ của các giao thức định tuyến và ứng dụng của Cảm biến không dây dưới nước Mạng lưới (UWSN)—Một cuộc khảo sát. *J. Sens. Mạng lưới truyền động.* **2020**, *9*, 19. [\[CrossRef\]](#)
89. Kumar, P.; Kumar, P.; Priyadarshini, P.; Srija. Mạng lưới cảm biến âm thanh dưới nước phục vụ cảnh báo sớm. Trong *Kỷ yếu Hội nghị Đại Dương 2012 MTS/IEEE: Khai thác Sức mạnh Đại dương, Hampton Roads, VA, Hoa Kỳ*, 14–19 tháng 10 năm 2012; trang 1–6. [\[CrossRef\]](#)

90. Marin-Perianu, M.; Chatterjea, S.; Marin-Perianu, R.; Bosch, S.; Dulman, S.; Kininmonth, S.; Havinga, P. Giám sát sóng bằng mạng cảm biến không dây. Trong *Kỷ yếu Hội nghị Quốc tế năm 2008 về Cảm biến Thông minh, Mạng Cảm biến và Xử lý Thông tin*, Sydney, NSW, Úc, 15–18 tháng 12 năm 2008; trang 611–616. [\[CrossRef\]](#)
91. Gian, QA; Trần, DT; Nguyễn, DC; Nhu, VH; Tiên Bùi, D. Thiết kế và triển khai hệ thống cảnh báo sớm và giám sát sạt lở đất do mưa tại một địa điểm cụ thể: Nghiên cứu điển hình tại khu vực sạt lở đất Nam Đàn (Việt Nam). *Geomat. Nat. Hazards Risk* 2017, 8, 1978–1996. [\[CrossRef\]](#)
92. Abraham, MT; Satyam, N.; Pradhan, B.; Alamri, AM Giám sát địa kỹ thuật dựa trên IoT đối với các sườn dốc không ổn định để cảnh báo sớm sạt lở đất ở dãy Himalaya Darjeeling. *Sensors* 2020, 20, 2611. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
93. Gamperl, M.; Singer, J.; Thuro, K. Mạng lưới cảm biến địa chất vận vật kết nối Internet cho hệ thống cảnh báo sớm sạt lở đất hiệu quả về chi phí. *Sensors* 2021, 21, 2609. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
94. Aggarwal, S.; Mishra, PK; Sumakar, KV; Chaturvedi, P. Hệ thống giám sát lở đất triển khai IOT bằng camera video. Trong *Kỷ yếu Hội nghị quốc tế lần thứ 3 năm 2018 về hội tụ công nghệ, I2CT 2018*, Pune, Ấn Độ, 6–8 tháng 4 năm 2018; trang 3–6. [\[CrossRef\]](#)
95. Elmoulat, M.; Debauche, O.; Mahmoudi, S.; Mahmoudi, SA; Manneback, P.; Lebeau, F. Điện toán biên và trí tuệ nhân tạo để theo dõi sạt lở đất. *Procedia Comput. Sci.* 2020, 177, 480–487. [\[CrossRef\]](#)
96. Joshi, A.; Grover, J.; Kanungo, DP; Panigrahi, RK Hệ thống cảnh báo sớm lở đất đáng tin cậy được Edge hỗ trợ. Trong *Kỷ yếu Hội nghị Quốc tế lần thứ 16 của Hội đồng Ấn Độ IEEE năm 2019, INDICON 2019*, Rajkot, Ấn Độ, 13–15 tháng 12 năm 2019; trang 1–4. [\[CrossRef\]](#)
97. Li, Z.; Fang, L.; Sun, X.; Peng, W. Hệ thống giám sát và cảnh báo sớm nguy cơ địa chất dựa trên IoT 5G và ứng dụng của nó. *Eurasip J. Mạng lưới Cộng đồng Wirel* 2021, 2021, 1–16. [\[CrossRef\]](#)
98. Moulat, ME; Debauche, O.; Mahmoudi, S.; Brahim, LA; Manneback, P.; Lebeau, F. Hệ thống giám sát sử dụng Internet vận vật cho các vụ lở đất tiềm ẩn. *Procedia Comput. Sci.* 2018, 134, 26–34. [\[CrossRef\]](#)
99. Debauche, O.; Elmoulat, M.; Mahmoudi, S.; Ahmed Mahmoudi, S.; Guttadauria, A.; Manneback, P.; Lebeau, F. Hướng tới hệ thống cảnh báo sớm lở đất bằng sương mù–Điện toán biên và trí tuệ nhân tạo. *J. Hệ thống phổ biến. Mạng lưới lan tỏa.* 2021, 15, 11–17. [\[Tham chiếu chéo\]](#)