

DOI:10.22144/ctu.jvn.2022.064

ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG ỨNG DỤNG ẢNH VIỄN THĂM RADAR TRONG GIÁM SÁT SỤT LÚN MẶT ĐẤT TẠI THÀNH PHỐ CẦN THƠ TỪ NĂM 2015 ĐẾN NĂM 2020

Nguyễn Tấn Lợi* và Võ Quốc Tuấn

Khoa Môi trường và Tài nguyên Thiên nhiên, Trường Đại học Cần Thơ

*Người chịu trách nhiệm về bài viết: Nguyễn Tấn Lợi (email: ngtloi@ctu.edu.vn)

Thông tin chung:

Ngày nhận bài: 18/01/2022

Ngày nhận bài sửa: 08/03/2022

Ngày duyệt đăng: 14/03/2022

Title:

Assessment of on the possibility of using radar remotely sensed data in monitoring land subsidence in Can Tho City from 2015 to 2020

Từ khóa:

PSInSAR, radar, sụt lún đất, thành phố Cần Thơ

Keywords:

Can Tho City, Land Subsidence, PSInSAR, radar

ABSTRACT

Land subsidence has been taking place in many locations in the Mekong Delta, due to a combination of natural and human activities. The application of radar remote sensing images in monitoring land subsidence has helped managers to capture fast and synchronous information on a large scale. The objectives of this study were to assess the possibility of using radar remote sensing for monitoring of land subsidence in Can Tho city. Persistent scatterer SAR interferometry (PSInSAR) method on Sentinel-1 time series data to analyze land subsidence was applied in this study. The results showed that the average land subsidence rate in Can Tho city was -13.2 mm/year and with the correlation coefficient of Pearson $R \approx 0.88$ when compared to field measurement data, and $R \approx 0.93$ when compared to land subsidence data collected from GIZ, BGR and BKK. Therefore, the result showed that this is high possibility of using radar remote sensing to monitor land subsidence in Can Tho city.

TÓM TẮT

Sụt lún đất đã và đang diễn ra nhiều nơi tại đồng bằng sông Cửu Long, do sự kết hợp của các yếu tố tự nhiên và con người. Sự ứng dụng ảnh viễn thám radar trong giám sát sụt lún đất đã giúp các nhà quản lý nắm bắt thông tin nhanh và đồng bộ trên diện rộng. Mục tiêu của nghiên cứu này là đánh giá khả năng ứng dụng ảnh viễn thám radar trong giám sát sụt lún đất tại thành phố Cần Thơ. Phương pháp giao thoa tán xạ liên tục (PSInSAR) trên ảnh vệ tinh Sentinel-1 đa thời gian được sử dụng để phân tích sụt lún đất. Kết quả nghiên cứu cho thấy tốc độ sụt lún đất trung bình tại thành phố Cần Thơ là -13,2 mm/năm, với hệ số tương quan Pearson (R) $\approx 0,88$ khi so sánh với dữ liệu sụt lún đất đo đạc thực địa và $R \approx 0,93$ khi so sánh với dữ liệu sụt lún đất được thu thập từ GIZ, BGR và BKK. Qua đó cho thấy, việc sử dụng ảnh viễn thám radar trong giám sát sụt lún đất có khả năng ứng dụng cao tại thành phố Cần Thơ.

1. GIỚI THIỆU

Hiện nay, sụt lún đất đã và đang diễn ra nhiều nơi tại khu vực đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL), đặc biệt tại các thành phố lớn như thành

phố Cần Thơ (TP. Cần Thơ). Sụt lún đất làm ảnh hưởng đến đời sống, kinh tế và xã hội của người dân (Mason et al., 2010), là nguyên nhân gây ra biến dạng bề mặt đất, gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến

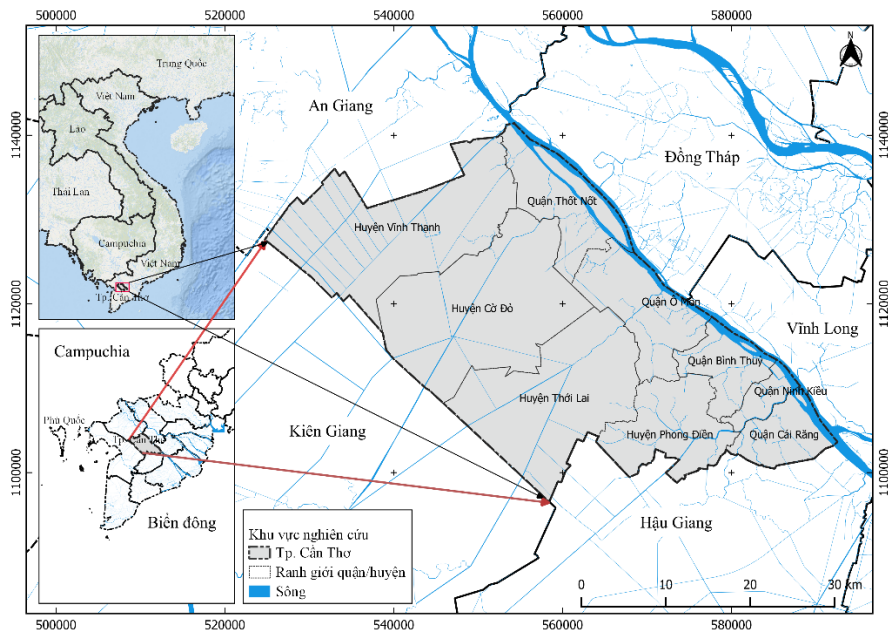
công trình xây dựng, khu công nghiệp cũng như môi trường sống của con người (Olaf, 2019). Theo Dang et al. (2014), sụt lún đất là một trong những nguyên nhân chính gây phá hủy cấu trúc công trình đô thị. Đặc biệt, sụt lún đất kết hợp với nước biển dâng làm tăng nguy cơ ngập lụt tại các khu vực đô thị như TP. Cần Thơ, làm mặt nước tương đối tại ĐBSCL tăng 22,3 mm/năm (Takagi et al., 2016). Vì vậy, cần có biện pháp theo dõi và giám sát sụt lún đất kịp thời để đề ra các giải pháp phòng chống và thích ứng phù hợp.

Trước đây, việc giám sát sụt lún đất được thực hiện bằng các phương pháp đo đạc truyền thống nên tốn nhiều thời gian và chi phí. Ngày nay, phương pháp ứng dụng ảnh viễn thám radar trong giám sát sụt lún đất đã mang lại nhiều hiệu quả (Minderhoud et al., 2018), giúp nhà quản lý nắm bắt thông tin nhanh và đồng bộ trên diện rộng. Đặc biệt với sự ra đời của ảnh viễn thám radar Sentinel-1 với độ phân giải không gian 20 m, cao nhất trong các loại ảnh radar được cung cấp miễn phí hiện nay, giúp tăng cường độ tin cậy trong các ứng dụng giám sát sụt lún đất.

Do đó, nhiều nước trên thế giới như Hoa Kỳ, Úc, Nhật, đặc biệt là Trung Quốc (Chen et al., 2016), Thái Lan (Aobpaet et al., 2013) đã ứng dụng thành công công nghệ vũ trụ để xác định tốc độ sụt lún bề mặt đất. Ở Việt Nam, công nghệ viễn thám và phương pháp giao thoa tán xạ liên tục (PSInSAR -

Persistent scatterer SAR interferometry) bằng ảnh radar cũng được phát triển, đây được xem là phương pháp khả thi trong giám sát các biến dạng bề mặt đất theo không gian và thời gian. Phương pháp PSInSAR sử dụng thông tin pha của ảnh SAR để xác định sự dịch chuyển bề mặt đất theo thời gian (Trung & Có, 2018). Việc sử dụng bộ dữ liệu ảnh đa thời gian làm tăng tín hiệu giao thoa, giúp xác định các vật phản xạ ổn định và tính toán tốc độ dịch chuyển trung bình mặt đất có độ chính xác cao (Peltzer et al., 2001), độ chính xác đạt mức 4,3 mm/năm khi so sánh với phương pháp thủy chuẩn (Dinh et al., 2015; Kim et al., 2021).

Đặc biệt, sử dụng phương pháp PSInSAR trên nền tảng SNAP-StaMPS (SNAP-Stanford method of persistent scatterer) mới được phát triển, có khả năng phân tích giao thoa pha tán xạ liên tục theo chuỗi thời gian. SNAP-StaMPS được phát triển giúp tăng khả năng phân tích ở các bề mặt khô cằn, cũng như khu vực có nhiều vật thể nhân tạo như các tòa nhà, cầu và đường giao thông (Tre Altamira, 2018). SNAP-StaMPS sử dụng biên độ pha và thông tin giao thoa pha trên từng điểm ảnh để loại bỏ các điểm nhiễu và lựa chọn các điểm phù hợp để phân tích giao thoa pha tán xạ liên tục (Orellana et al., 2020). Vì vậy, nghiên cứu được thực hiện nhằm đánh giá khả năng ứng dụng ảnh viễn thám radar trong giám sát sụt lún đất, trường hợp nghiên cứu tại TP. Cần Thơ Hình 1.



Hình 1. Bản đồ khu vực nghiên cứu

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Thu thập số liệu và đo đạc thực địa

2.1.1. Thu thập dữ liệu

Dữ liệu ảnh vệ tinh Sentinel-1

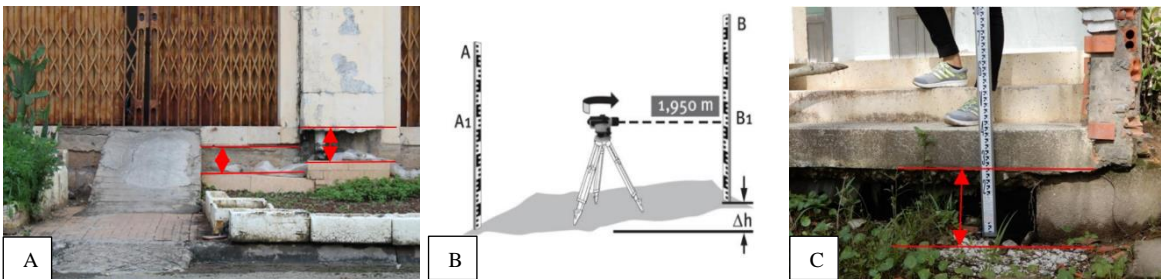
Nghiên cứu thu thập 12 ảnh vệ tinh Sentinel-1 tại TP. Cần Thơ trong giai đoạn từ năm 2015 đến năm 2020 trên website: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. Theo nghiên cứu của Crosetto et al. (2016), kỹ thuật PSInSAR cần phải có số lượng tập hợp ảnh đủ lớn để có thể tối ưu hóa việc lọc và hiệu chỉnh các điểm nhiễu giúp cho ra kết quả phân tích có độ chính xác cao, thông thường số lượng tập hợp ảnh phải từ 12 ảnh trở lên.

Dữ liệu sụt lún đất tại ĐBSCL

Thu thập dữ liệu sụt lún đất tại ĐBSCL trên website Copernicus: <https://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-components/EMSN062> do Tổ chức Hợp tác Quốc tế Cộng hòa Liên bang (CHLB) Đức GIZ và Viện Khoa học Địa chất và Tài nguyên CHLB Đức (BGR) phối hợp với Cục Cứu trợ và Phòng chống thiên tai tại CHLB Đức (BKK) thực hiện.

2.1.2. Đo đạc thực địa sụt lún đất

Nghiên cứu đo đạc dữ liệu sụt lún đất thông qua chênh lệch độ cao giữa mức nền công trình cũ và mặt đất hiện tại ở các tòa nhà được xây dựng có nền móng kiên cố bằng máy thủy bình điện tử Topcon



Hình 2. Các bước đo lường sụt lún đất: lựa chọn các công trình lý tưởng để đo đạc (Hình A), mô phỏng nguyên lý đo đạc (Hình B), tiến hành đo đạc (Hình C)

2.2. Phương pháp phân tích sụt lún đất từ ảnh Sentinel-1 tại TP. Cần Thơ

Phương pháp PSInSAR trên nền tảng SNAP-StaMPS được sử dụng để phân tích giao thoa tán xạ liên tục. Ở phương pháp này, thông tin giao thoa pha của ảnh SAR được sử dụng để xác định độ dịch chuyển mặt đất theo thời gian. Thông tin giao thoa pha được xác định thông qua độ lệch pha ($\Delta\phi$) giữa hai lần thu nhận ảnh, qua đó tính toán độ dịch chuyển bề mặt đất (ΔR), đây cũng chính là chiều sâu sụt lún đất theo thời gian.

Orion 2LS tương tự như nghiên cứu của Kim et al. (2021), được mô tả trong Hình 2. Đồng thời, các thông tin cơ bản của công trình được thu thập như thời gian xây dựng và sửa chữa, mức độ kiên cố, vật liệu nền đất để tính toán tốc độ sụt lún đất.

Nguyên lý đo đạc mức độ sụt lún đất bằng máy kinh vĩ:

Bước 1: Lựa chọn các công trình lý tưởng để đo đạc:

- Các công trình lớn, tiêu biểu có nền móng kiên cố (chiều sâu ép cọc >30 m) được đề xuất bởi Sở Xây dựng TP. Cần Thơ.
- Nhận biết sự chênh lệch rõ ràng giữa mặt đất hiện tại và mặt đất trước đây
- Dễ dàng tiếp cận và đo đạc

Bước 2: Thực hiện đo độ cao của điểm chuẩn A được gọi là A1.

Bước 3: Dịch chuyển thước đo và đo độ cao của điểm B được gọi là B1.

Bước 4: Xác định chênh lệch độ cao giữa A và B là $\Delta h = B1 - A1$, cũng chính là chiều sâu sụt lún đất của điểm cần đo B so với điểm chuẩn A.

Bước 5: Tính toán tốc độ sụt lún:

$$\text{Tốc độ sụt lún đất} = \frac{\text{Chiều sâu sụt lún đất}}{\text{Tuổi công trình (năm)}} \quad (1)$$

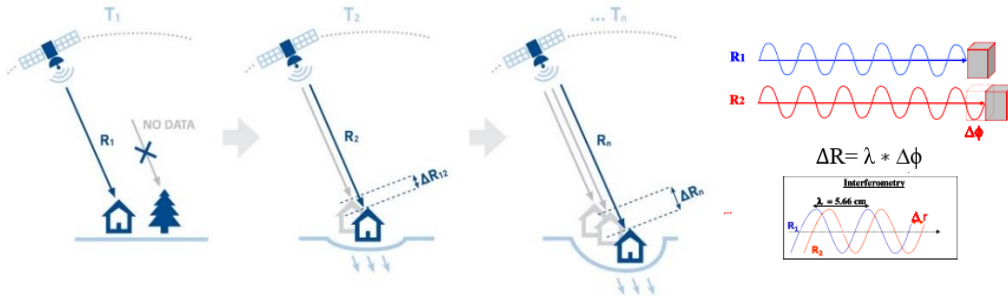
Thông tin pha (ϕ) được xác định thông qua công thức: $\phi = 4 * \pi * R / \lambda$, trong đó λ là độ dài bước sóng ($\lambda = 5,66$ cm), R là khoảng cách từ cảm biến vệ tinh đến mặt đất. Nếu thông tin pha giữa hai lần thu nhận ảnh có dao động, thì độ dịch chuyển bề mặt đất sẽ được xác định theo công thức: $\Delta R = \lambda * \Delta\phi$, (Dinh, 2010), được thể hiện trong Hình 3. Tập hợp các dịch chuyển bề mặt đất theo thời gian (ΔR_n) giúp xác định chính xác tốc độ sụt lún đất, do trong quá trình phân tích đã hiệu chỉnh và loại bỏ các điểm ảnh bị nhiễu bởi địa hình và khí quyển (Trung & Có, 2018).

Thông tin pha của dữ liệu ảnh Sentinel-1 vào tháng 3 năm 2015 được sử dụng làm chuẩn so sánh với thông tin pha của dữ liệu ảnh ở các thời điểm khác.

Sụt lún đất được thể hiện thông qua tốc độ sụt lún đất (hay vận tốc sụt lún đất, đơn vị là mm/năm) và chiều sâu sụt lún đất (đơn vị là mm). Nếu bề mặt đất dịch chuyển theo phương thẳng đứng, từ trên xuống dưới thì xảy ra hiện tượng sụt lún đất, tốc độ

sụt lún đất sẽ có kết quả âm, ngược lại nếu bề mặt đất dịch chuyển nâng lên thì tốc độ sụt lún đất sẽ có kết quả dương. Tốc độ sụt lún đất được xác định bằng thương số giữa chiều sâu sụt lún đất và thời gian sụt lún đất, được thể hiện công thức (2).

$$\text{Tốc độ sụt lún đất} = \frac{\text{chiều sâu sụt lún}}{\text{thời gian sụt lún}} \quad (2)$$



Hình 3. Nguyên lý thực hiện của phương pháp PSInSAR

(Nguồn: Dinh, 2010; Tre Altamira, 2018)

Phương pháp PSInSAR được thể hiện trong Hình 4, bao gồm 3 bước chính:

Bước 1: Chuẩn bị dữ liệu giao thoa pha (Pre-processing phase), bao gồm 3 phần chính:

Phần A: Chuẩn bị sản phẩm đầu vào cho quá trình xử lý pha (Pre-processing of all products): dữ liệu giao thoa kết IW loại dữ liệu chính trên đất liền của ảnh Sentinel-1, dữ liệu này có dung lượng rất lớn (8GB/ảnh), vì thế cần thực hiện bước TopSAR Split để giới hạn lại khu vực nghiên cứu và tiếp đến thực hiện chức năng Apply Orbit để cung cấp các thông tin như vị trí và vận tốc cho dữ liệu đầu vào.

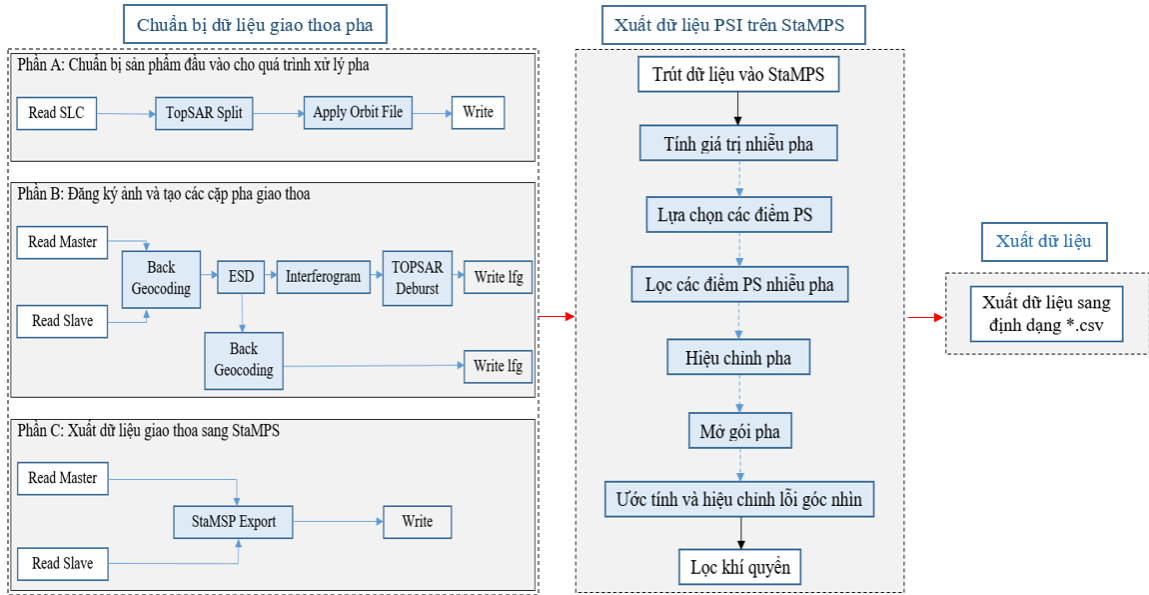
Phần B: Đăng ký ảnh và tạo các cặp giao thoa pha (pairwise coregistration and interferogram generation): Đồng đăng ký ảnh và tạo pha giao thoa là một trong những bước quan trọng trong xử lý dữ liệu ảnh radar tạo giao thoa kế, giúp dữ liệu ảnh Sentinel-1 đồng nhất về thông tin dữ liệu với nhau (Chen et al., 2016), bao gồm các bước: đồng đăng ký (Back Geocoding), nâng cao sự đa dạng phổ (Enhanced Spectral Diversity – ESD), giao thoa kế (Interferogram), ghép các ảnh chụp và tuyến quét (TOPSAR Deburst).

Phần C: Xuất dữ liệu giao thoa pha sang StaMPS (Export of the interograms for the processing in

StaMPS): Các kết quả pha giao thoa được nền tảng StaMPS chứa trong thư mục chung “INSAR_master_data” và phân tách thành 4 thư mục con bao gồm: dem, diff0, geo, rslc.

Bước 2: Phân tích dữ liệu PSI trên nền tảng StaMPS là sử dụng bộ câu lệnh cho phép trích xuất sự dịch chuyển mặt đất theo chuỗi thời gian từ dữ liệu radar khẩu độ tổng hợp (SAR). Việc đầu tiên cần làm là khai báo dữ liệu từ SNAP vào StaMPS bằng dòng lệnh có sẵn được gọi là “mt_prep_snap”, sau đó sử dụng dòng lệnh “Matlab” để mở công cụ Matlab. Cuối cùng là phân tích dữ liệu trên StaMPS được thực hiện bằng một tập hợp lệnh có sẵn được gọi là “stamps (1,8)” trên công cụ Matlab. Tập lệnh này sẽ được chạy tự động từ bước 1 đến bước 8 bao gồm: 1. Tải dữ liệu, 2. Tính giá trị nhiễu pha, 3. Lựa chọn điểm PS, 4. Lọc các điểm PS nhiễu pha, 5. Hiệu chỉnh pha, 6. Mở gói pha, 7. Ước tính các lỗi góc nhìn và 8. Lọc khí quyển.

Bước 3: Xuất dữ liệu dịch chuyển dọc sang định dạng *.csv bằng các dòng lệnh, từ đó các dữ liệu dạng file *.csv có thể phân tích và hiển thị trên các phần mềm GIS.



Hình 4. Sơ đồ kỹ thuật PSInSAR

2.3. Nội suy dữ liệu sụt lún đất

Phương pháp PSInSAR trên nền tảng SNAP-StaMPS được sử dụng để phân tích sụt lún đất có độ chính xác cao, tuy nhiên dữ liệu sụt lún đất sau khi được phân tích lại ở dạng điểm và tập trung ở các khu vực đô thị. Chính vì thế, nghiên cứu thực hiện phương pháp nội suy không gian để ước tính các giá trị sụt lún đất ra toàn khu vực TP. Cần Thơ, được thể hiện trong Hình 5. Phương pháp được sử dụng trong nghiên cứu là phương pháp nội suy láng giềng gần nhất (Natural Neighbor) trên phần mềm ArcGIS. Đây là phương pháp nội suy phù hợp với nguyên lý hoạt động sụt lún đất, các điểm ảnh mới sẽ lấy giá trị của điểm ảnh gốc gần nhất và không xem xét các điểm giá trị khác (Phương, 2017).

2.4. Đánh giá độ tin cậy kết quả phân tích sụt lún đất từ ảnh Sentinel-1

Độ tin cậy của kết quả phân tích sụt lún đất từ ảnh Sentinel-1 được thể hiện thông qua kết quả đánh giá tương quan giữa dữ liệu sụt lún đất được phân tích từ ảnh Sentinel-1 với các dữ liệu sụt lún đất khác như dữ liệu sụt lún đất đo đạc thực địa và dữ liệu sụt lún đất thu thập từ GIZ, BGR và BKK, đây là 2 bộ dữ liệu có độ chính xác cao và đã được kiểm chứng trong nghiên cứu của Minderhoud et al. (2020) và Kim et al. (2021).

2.4.1. Đánh giá tương quan giữa dữ liệu sụt lún đất phân tích từ ảnh Sentinel-1 với kết quả đo đạc thực địa sụt lún đất

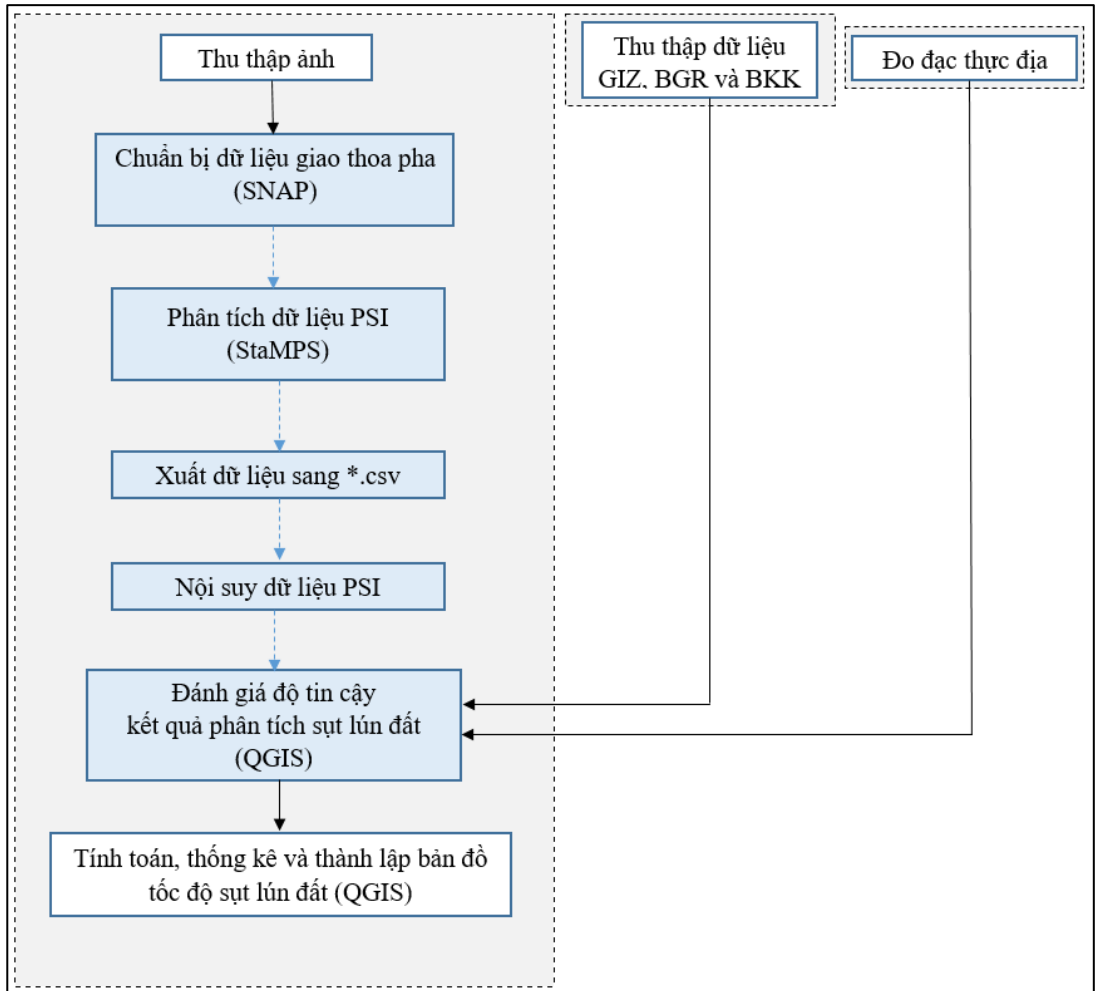
Tương quan tuyến tính giữa kết quả phân tích sụt lún đất từ ảnh Sentinel-1 với kết quả đo đạc thực địa sụt lún đất tại các điểm khảo sát tại khu vực TP. Cần Thơ được tiến hành đánh giá. Phương pháp đánh giá tương quan tuyến tính Pearson (R) được sử dụng với hệ số R giao động từ -1 đến 1 (R càng tiến đến 1 hoặc -1 thì có sự tương quan càng cao, R bằng 0 thì không có sự tương quan). Đồng thời, sự tương đồng về tốc độ sụt lún trung bình giữa hai bộ dữ liệu này cũng được đánh giá thông qua giá trị R^2 .

2.4.2. Đánh giá tương quan giữa quan giữa dữ liệu sụt lún đất phân tích từ ảnh Sentinel-1 với dữ liệu sụt lún đất thu thập từ GIZ, BGR và BKK

Công thức của Salkind, (2000) được sử dụng để tính toán số lượng điểm PSI để đánh giá tương quan, thể hiện trong công thức 3. Với tổng số lượng điểm PSI là 32.478 và mức ý nghĩa 95%, 395 điểm ngẫu nhiên được lựa chọn để tiến hành đánh giá tương quan tuyến tính Pearson giữa dữ liệu sụt lún đất được phân tích từ ảnh Sentinel-1 với dữ liệu sụt lún đất được thu thập từ GIZ, BGR và BKK, được thể hiện trong Hình 5.

$$n = \frac{N}{1+N \cdot e^2} \quad (\text{Salkind, 2000}) \quad (3)$$

Trong đó: n là cỡ mẫu, N là tổng số lượng điểm PSI, e là mức độ sai số (e=0,05)



Hình 5. Sơ đồ phương pháp nghiên cứu

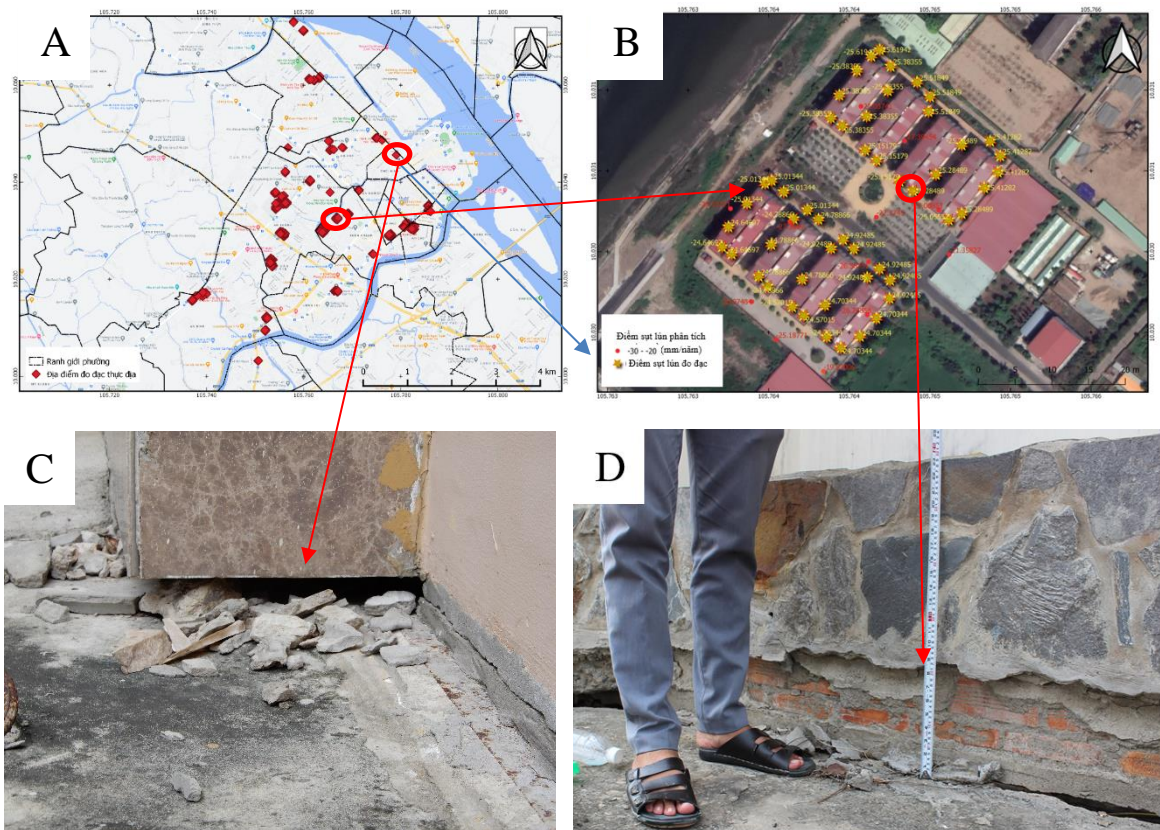
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả đo đạc thực địa sụt lún đất tại TP. Cần Thơ

Chiều sâu sụt lún đất được đo tại 338 điểm khảo sát, xung quanh 37 công trình xây dựng kiên cố tại khu vực TP. Cần Thơ, phân bố các điểm khảo sát được thể hiện trong Hình 6A. Từ kết quả đo đạc thực địa kết hợp với thông tin tuổi công trình được thu thập, tốc độ sụt lún đất trung bình tại TP. Cần Thơ được tính là ~-21,37 mm/năm. Qua đó cho thấy, tốc độ sụt lún đất khu vực TP. Cần Thơ đang diễn ra nhanh.

Kết quả nghiên cứu cho thấy phương pháp đo đạc sụt lún đất có nhược điểm như thông tin về tuổi

công trình và thời điểm nâng cấp xây dựng rất dễ nhầm lẫn trong quá trình thu thập số liệu nên ảnh hưởng đến quá trình tính toán tốc độ sụt lún đất trung bình. Bên cạnh đó, bản thân các công trình được lựa chọn để đo đạc cũng xảy ra hiện tượng sụt lún (rất ít). Tốc độ sụt lún của công trình phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố như độ sâu móng cọc, chiều cao, trọng lượng của các công trình khác nhau sẽ dẫn đến tốc độ sụt lún khác nhau, chính vì thế tốc độ sụt lún này chưa thể hiệu chỉnh. Tuy nhiên, các điểm đo đạc có thông tin không chắc chắn được loại bỏ trong nghiên cứu để giảm thiểu các sai số trong quá trình đo đạc và tính toán tốc độ sụt lún đất.



Hình 6. Kết quả đo đạc sụt lún đất tại TP. Cần Thơ: (A) Bản đồ phân bố các điểm khảo sát; (B) Kết quả đo đạc sụt lún đất tại Ký túc xá B, Trường Đại học Cần Thơ; (C) Điểm sụt lún đất tại Đại lý xe Toyota Ninh Kiều; (D) Điểm sụt lún đất tại Ký túc xá B

3.2. Kết quả phân tích sụt lún đất từ ảnh Sentinel-1

3.2.1. Hiện trạng sụt lún đất tại TP. Cần Thơ

Kết quả nghiên cứu đã phân tích được 32.478 điểm PSI tại khu vực TP. Cần Thơ, tập trung nhiều nhất tại quận Ninh Kiều, quận Bình Thủy và quận Cái Răng, được thể hiện trong Hình 8. Với tốc độ sụt lún trung bình là -13,2 mm/năm, sụt lún đất diễn ra nhanh nhất được tìm thấy tại khu vực phường Cái Khế, quận Ninh Kiều (~-77,9 mm/năm) và sụt lún đất chậm nhất được tìm thấy tại khu vực ven sông Hậu thuộc phường Thới Long, quận Ô Môn, với mật đất được nâng lên hàng năm ~4,5 mm/năm, được thể hiện trong Hình 8.

Tại TP. Cần Thơ, giá trị tốc độ sụt lún đất có sự chênh lệch lớn, giao động từ ~-77,9 mm/năm đến ~4,5 mm/năm và tần suất xuất hiện giá trị tốc độ sụt lún đất cũng không đồng đều. Tốc độ sụt lún đất có mật độ tần suất cao nhất ~-7 mm/năm với 2.899 điểm PSI, điều này cho thấy tốc độ sụt lún đất phổ

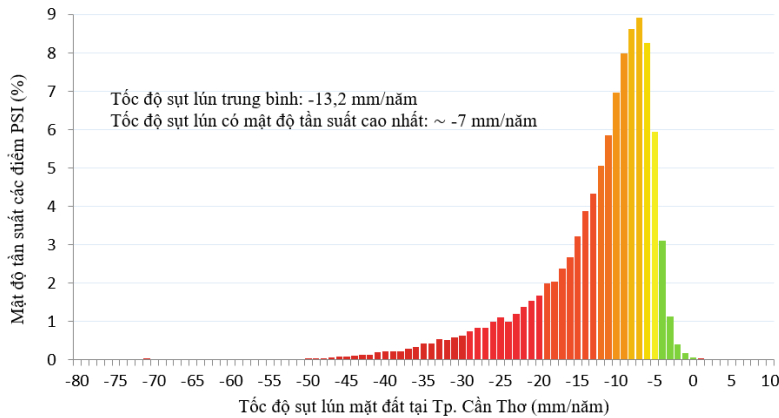
biến nhất chỉ ~-7 mm/năm, được thể hiện trong Hình 7.

Biểu đồ Hình 9 cho thấy có sự chênh lệch lớn (~-6,2 mm/năm) giữa giá trị tốc độ sụt lún đất trung bình và tốc độ sụt lún đất phổ biến nhất. Nguyên nhân là do phương pháp PSI chỉ phân tích sụt lún đất tại các khu vực có tán xạ cố định như có nhiều vật thể nhân tạo, tuy nhiên các khu này lại là nơi có tốc độ sụt lún nhanh hơn các khu vực khác như khu vực đất nông nghiệp, khu vực đất trồng nhiều thực vật,... (Stramondo, et al., 2008). Chính vì thế, giá trị sụt lún đất trung bình có xu hướng cao hơn so với tốc độ sụt lún đất phổ biến tại nhiều nơi.

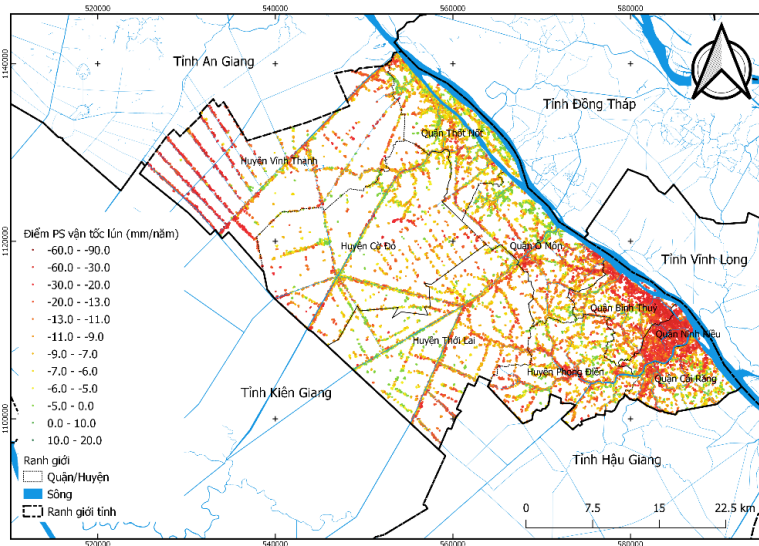
Hình 8 cho thấy phương pháp PSInSAR chỉ phân tích tốc độ sụt lún đất thông qua các điểm tán xạ liên tục, các điểm này xuất hiện nhiều nhất tại các khu vực đô thị, công trình giao thông, đất trồng, đây là ưu điểm lớn nhất của phương pháp PSInSAR vì đã hiệu chỉnh và loại bỏ các điểm PSI bị nhiễu (các điểm PSI giao động pha bất thường), giúp tăng độ chính xác cho kết quả phân tích sụt lún đất tại các

khu vực này. Tuy nhiên, các khu vực có nhiều biến động thì không thể phân tích các điểm PSI, vì vậy cần ứng dụng thêm phương pháp nội suy không gian để ước đoán sụt lún đất ra các khu vực này, điều này

rất dễ gây ra sai số cho các vùng có nhiều biến động như thực vật hoặc các công trình mới được xây dựng.



Hình 7. Tần suất giá trị các điểm PSI trên khu vực TP. Cần Thơ



Hình 8. Các điểm PSI tốc độ sụt lún đất tại TP. Cần Thơ

3.2.2. Hiện trạng sụt lún đất tại các quận, huyện trên khu vực TP. Cần Thơ

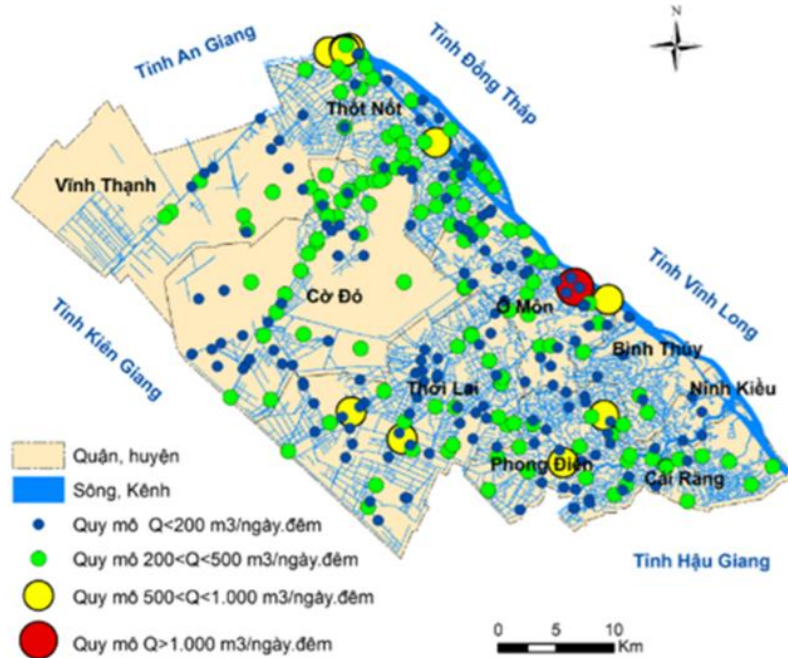
Kết quả nghiên cứu cho thấy tốc độ sụt lún đất diễn ra không đồng đều tại các quận/huyện thuộc TP. Cần Thơ, được thể hiện trong Hình 10 và Hình 11. Quận Ninh Kiều là nơi có tốc độ sụt lún đất diễn ra nhanh nhất, với tốc độ sụt lún đất trung bình là -23,12 mm/năm và tốc độ sụt lún đất phổ biến nhất ~-19 mm/năm. Vì đây là quận trung tâm của thành phố, nơi có mật độ đô thị cao và cơ sở hạ tầng giao thông dày đặc nên tốc độ sụt lún đất tại khu vực Quận Ninh Kiều diễn ra nhanh; tương tự như kết quả

nghiên cứu của Abidin et al. (2011) và Dang et al. (2014) thì đô thị hóa và tải trọng công trình giao thông là một trong những nguyên nhân chính gây ra sụt lún đất. Và theo nghiên cứu của Lợi, (2021) tại Quận Ninh Kiều cho thấy tốc độ sụt lún đất tại khu vực đô thị diễn ra nhanh hơn tốc độ sụt lún đất tại khu vực không đô thị, khoảng giá trị chênh lệch dao động từ -7,99 mm/năm đến -4,28 mm/năm và khu vực có mật độ đô thị càng cao thì có tốc độ sụt lún đất càng nhanh.

Bên cạnh đó, việc hạ thấp mực nước dưới đất do khai thác nước ngầm cũng là một trong những nguyên nhân chính gây ra sụt lún đất. Điều này dễ

dạng nhận thấy khi so sánh giữa quy mô khai thác nước ngầm và tốc độ sụt lún đất tại quận Bình Thủy. Đây là khu vực có hai giếng khai thác nước ngầm lớn nhất thành phố (một giếng có quy mô $500 < Q < 1.000 \text{ m}^3/\text{ngày.đêm}$ và một giếng có quy mô $Q > 1.000 \text{ m}^3/\text{ngày.đêm}$) được thể hiện trong

Hình 9 và tốc độ sụt lún đất trung bình tương ứng là $-16,79 \text{ mm/năm}$ được thể hiện trong Hình 10, kết quả này cũng tương tự như kết quả nghiên cứu của Tỳ và Hiệp (2017) với tốc độ sụt lún trung bình $-19,7 \text{ mm/năm}$ trong giai đoạn từ 2004 đến 2015.



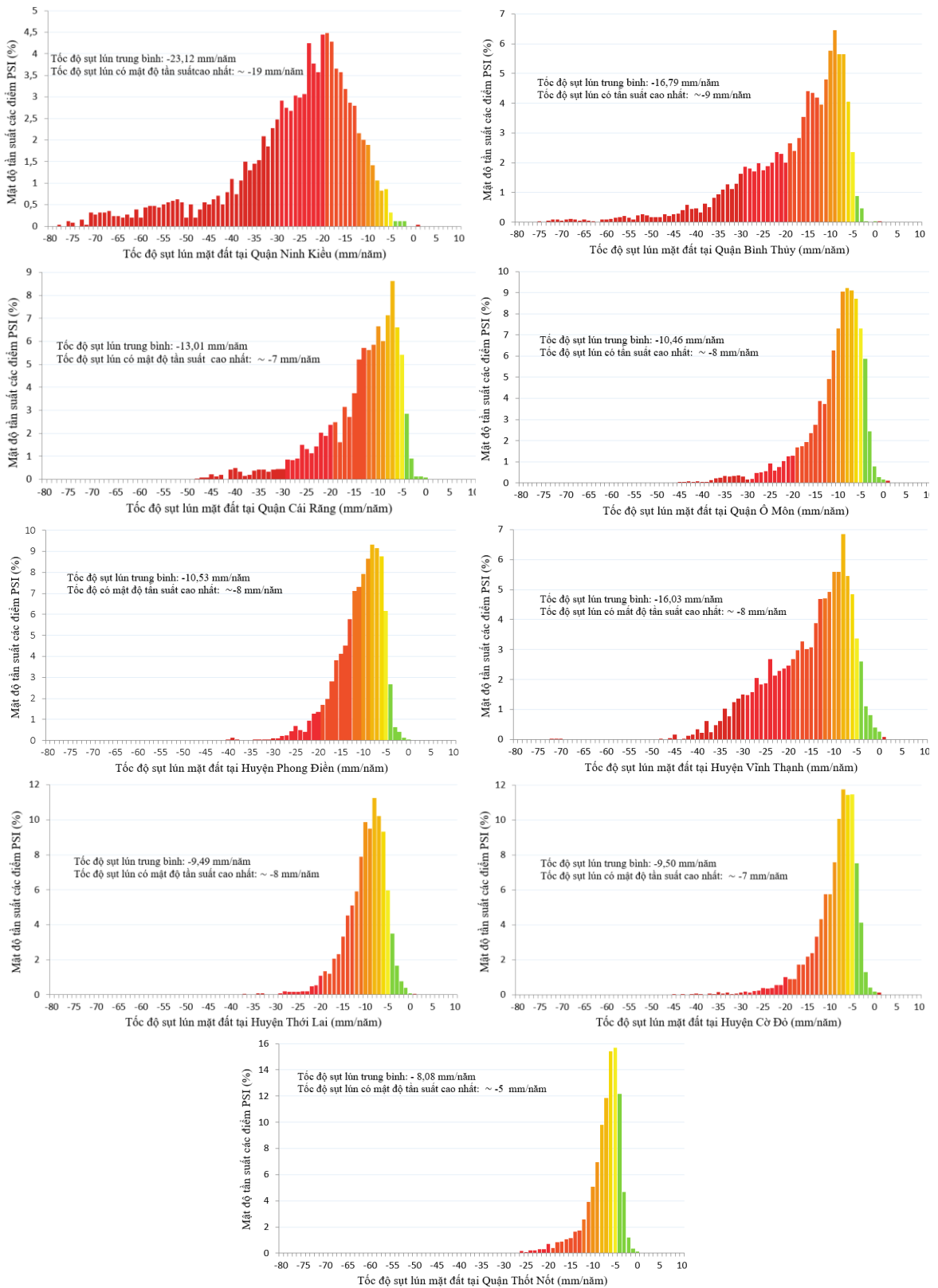
Hình 9. Vị trí giếng khai thác và quy mô khai thác

(Nguồn: Tỳ & Hiệp, 2017)

Khu vực quận Thốt Nốt là khu vực có tốc độ sụt lún đất chậm nhất, với tốc độ sụt lún đất trung bình là $-8,08 \text{ mm/năm}$ và tiếp theo đó là huyện Thới Lai và huyện Cờ Đỏ với tốc độ sụt lún đất tương ứng là $-9,49 \text{ mm/năm}$ và $-9,50 \text{ mm/năm}$. Bên cạnh, tốc độ sụt lún đất phổ biến tại quận Thốt Nốt cũng chỉ $\sim 5 \text{ mm/năm}$ và kết tiếp theo là huyện Cờ Đỏ và quận Cái Răng với tốc độ sụt lún đất phổ biến là $\sim 7 \text{ mm/năm}$, được thể hiện trong Hình 10. Ngược lại với quận Ninh Kiều thì quận Thốt Nốt, huyện Thới Lai và huyện Cờ Đỏ là 3 khu vực có mật độ đô thị thấp và ít cơ sở hạ tầng giao thông, do đó tốc độ sụt lún đất tại các khu vực này diễn ra chậm.

Hình 8, Hình 10 và Hình 11 cho thấy khu vực huyện Vĩnh Thạnh có tốc độ sụt lún tương đối cao với tốc độ sụt lún đất trung bình là $-16,03 \text{ mm/năm}$ nhưng có tốc độ sụt lún đất phổ biến nhất chỉ -8 mm/năm , tập trung chủ yếu dọc theo các tuyến đường giao thông. Mặc dù khu vực này chỉ khai thác nước ngầm ở quy mô nhỏ và làm nông nghiệp là chủ

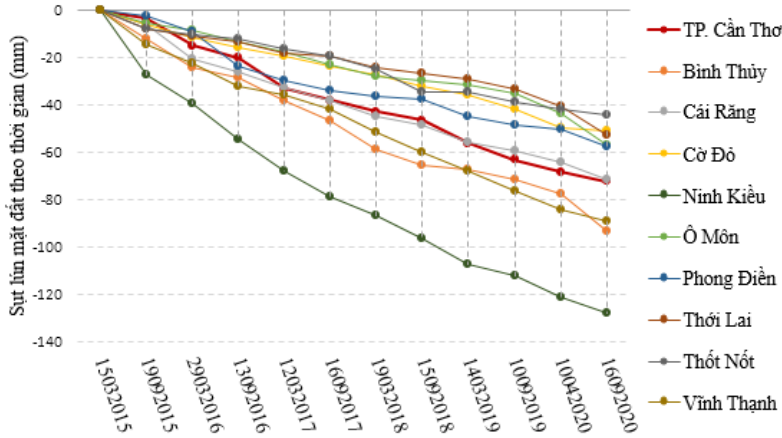
yếu, nhưng khu vực phía Tây Bắc huyện Vĩnh Thạnh bao gồm các xã Thạnh Lợi, Thạnh Thắng và xã Thạnh An có các tuyến đường giao thông mới được xây dựng trên nền đất nông nghiệp, vì thế dưới tác động của đô thị hóa và tải trọng phương tiện giao thông, trong thời gian này tốc độ sụt lún của các tuyến đường giao thông xảy ra nhanh. Qua đó có thể thấy được hạn chế của phương pháp PSInSAR khi phân tích sụt lún đất tại các khu vực sản xuất nông nghiệp, do trong quá trình lựa chọn các điểm PSI để phân tích sụt lún đất đã hiệu chỉnh và loại bỏ các điểm PSI nhiễu nên các khu vực có nhiều thực vật sẽ không thể tạo các điểm PSI. Vì vậy, các khu vực như Vĩnh Thạnh, Cờ Đỏ, Thới Lai chỉ phân tích các điểm PSI tại các tuyến đường giao thông chính và khu vực đô thị trung tâm của quận/huyện. Đây cũng là nguyên nhân làm cho tốc độ sụt lún đất trung bình cao hơn tốc độ sụt lún đất phổ biến nhất, các khu vực đường giao thông và đô thị có tốc độ sụt lún đất nhanh hơn các khu vực khác Abidin et al. (2011) và Dang et al. (2014).



Hình 10. Mật độ tần suất các điểm PSI tại các quận/huyện trong khu vực TP. Cần Thơ

Kết quả nghiên cứu sụt lún đất tại TP. Cần Thơ được thể hiện trong Hình 11 cho thấy bề mặt đất đã sụt lún trung bình $\sim -72,03$ mm. Trong đó, quận Ninh Kiều và quận Bình Thủy là 2 khu vực có chiều sâu sụt lún đất lớn nhất, với chiều sâu sụt lún bề mặt đất tương ứng $-127,83$ mm và $-93,31$ mm. Quận Thốt Nốt là khu vực có chiều sâu sụt lún đất nhỏ

nhất, với chiều sâu sụt lún đất là $-44,31$ mm. Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy chiều sâu sụt lún đất tại TP. Cần Thơ diễn ra không đều theo từng năm, giao động từ $\sim -8,3$ mm/năm đến $\sim -17,8$ mm/năm, mức độ sụt lún bề mặt đất diễn ra nhanh nhất vào năm 2018 ($\sim -17,8$ mm/năm).



Hình 11. Chiều sâu sụt lún đất theo thời gian tại các quận/huyện của TP. Cần Thơ trong giai đoạn từ tháng 3 năm 2015 đến 9 năm 2020

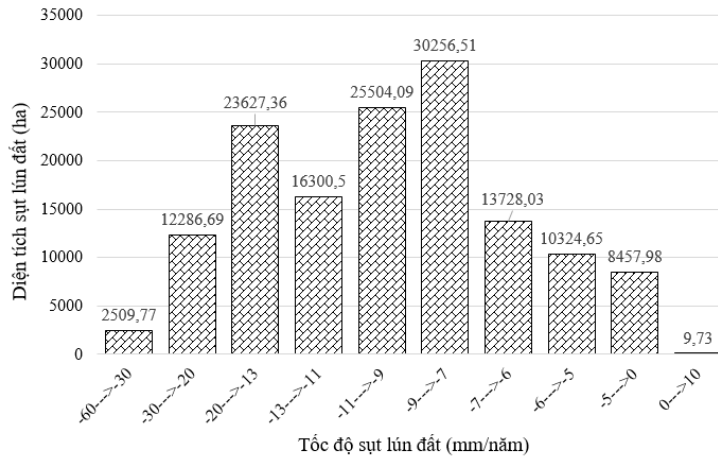
3.3. Kết quả nội suy dữ liệu sụt lún đất tại khu vực TP. Cần Thơ

Nghiên cứu đã thực hiện nội suy không gian các điểm PSI trên toàn bộ khu vực Cần Thơ được thể hiện trong Hình 13. Kết quả nghiên cứu cho thấy sụt lún đất diễn ra ở hầu hết các khu vực tại TP. Cần Thơ, chỉ một phần nhỏ diện tích (9,73 ha) bề mặt đất được nâng lên tại các khu vực quen sông Hậu thuộc quận Ô Môn và quận Thốt Nốt, đặc biệt tại phường Tân Lộc, quận Thốt Nốt là nơi có bề mặt đất được nâng lên nhiều nhất (0-10 mm/năm), được thể hiện trong Hình 12. Nguyên nhân do các khu vực này chịu tác động của việc bồi tụ bờ sông Hậu, kết quả nghiên cứu hiện trạng sạt lở và bồi tụ bờ sông của Điệp và ctv. (2019) và Lợi và ctv. (2019) tại các khu vực này là nơi bồi tụ đất hàng năm, vì thế bề mặt đất tại đây ngày càng được nâng lên.

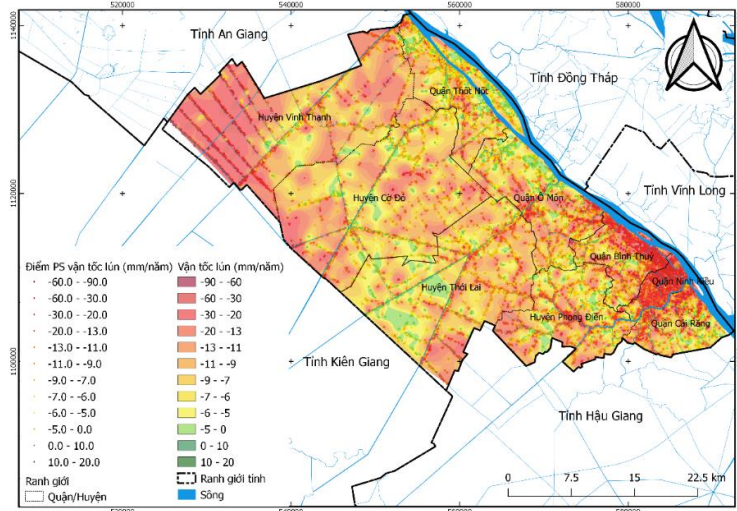
Kết quả tính toán diện tích sụt lún đất tại TP. Cần Thơ được thể hiện trong Hình 12 cho thấy tốc độ sụt lún đất có diện tích lớn nhất là từ -7 đến -9 mm/năm, với diện tích 30.257 ha. Các khu vực có tốc độ sụt lún nhanh nhất (~ -30 mm/năm đến ~ -60 mm/năm)

thuộc quận Ninh Kiều, quận Bình Thủy và một phần của quận Cái Răng, chiếm diện tích ~ 2.510 ha. Trong khi đó, các khu vực có tốc độ sụt lún đất chậm (~ 0 mm/năm đến ~ -5 mm/năm) thuộc các khu vực có tỷ lệ diện tích đất nông nghiệp cao như huyện Thới Lai và, huyện Cờ Đỏ với tổng diện tích sụt lún ~ 8.458 ha.

Hình 13 cho thấy nếu các khu vực có tỷ lệ diện tích đất nông nghiệp cao thì sai số trong quá trình nội suy lớn. Do phương pháp này chỉ phân tích sụt lún đất tại các tuyến đường giao thông và khu vực đô thị trung tâm quận/huyện, không thể phân tích sụt lún đất tại các khu vực đất nông nghiệp nên tại các khu vực này cần thực hiện phép nội suy không gian. Tuy nhiên, việc nội suy không gian lại dựa vào các điểm PSI đã được phân tích tại đường giao thông hoặc khu vực đô thị, nhưng các khu vực này có tốc độ sụt lún đất nhanh hơn khu vực đất nông nghiệp nên dẫn đến kết quả nội suy có sai số lớn, dẫn đến tốc độ sụt lún đất được nội suy lớn hơn tốc độ sụt lún đất thực tế, điển hình như tại khu vực phía Tây Bắc huyện Vĩnh Thạnh, đây cũng là một trong những nhược điểm lớn của phương pháp PSInSAR.



Hình 12. Diện tích sụt lún đất tại TP. Cần Thơ



Hình 13. Bản đồ nội suy các điểm PSI tốc độ sụt lún đất

3.4. Độ tin cậy của kết quả phân tích sụt lún đất từ ảnh Sentinel-1 tại TP. Cần Thơ

3.4.1. Kết quả đánh giá tương quan giữa dữ liệu sụt lún đất được phân tích từ ảnh Sentinel-1 với dữ liệu sụt lún đất đo đạc thực địa

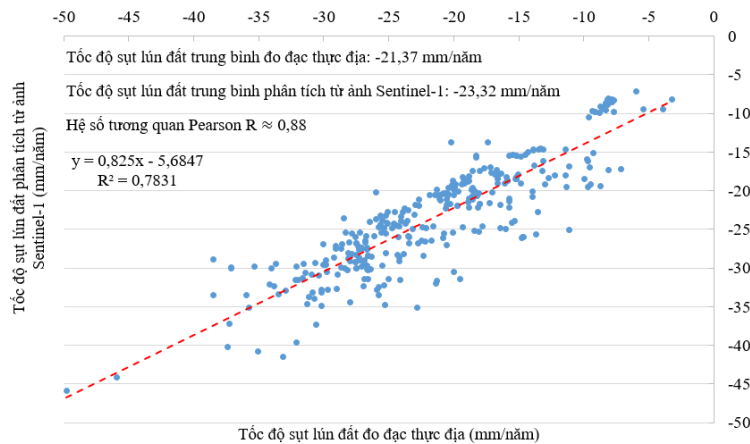
Kết quả đánh giá tương quan trong Hình 14 cho thấy có sự tương quan cao giữa dữ liệu sụt lún đất được phân tích từ ảnh Sentinel-1 với dữ liệu sụt lún đất đo đạc thực địa, với hệ số tương Pearson $R \approx 0,88$. Bên cạnh, phương trình mối quan hệ giữa hai bộ dữ liệu được xác định là: $y = 0,825x - 5,6847$, trong đó x: tốc độ sụt lún đất đo đạc thực địa và y: tốc độ sụt lún đất được phân tích từ ảnh Sentinel-1. Bên cạnh đó, tốc độ sụt lún đất trung bình của các điểm đo đạc thực địa cũng có sự tương đồng với tốc độ sụt lún đất trung bình được phân tích từ ảnh

Sentinel-1, với tốc độ sụt lún trung bình tương ứng $-21,37$ mm/năm (độ lệch chuẩn $\pm 7,8$ mm) so với $-23,32$ mm/năm (độ lệch chuẩn $\pm 7,2$ mm). Tốc độ sụt lún đất trung bình có độ lệch chuẩn tương đối cao là do tốc độ sụt lún đất trung bình ở các vị trí đo đạc có sự chênh lệch lớn, vì thế tốc độ sụt lún đất trung bình cũng có sự dao động lớn. Kết quả nghiên cứu giá trị sai số trung phương cho thấy dữ liệu sụt lún đất được phân tích từ ảnh Sentinel-1 thấp hơn dữ liệu sụt lún đất đo đạc thực địa là $4,1$ mm/năm, kết quả này cũng tương tự như kết quả nghiên cứu của Dinh et al. (2015) và Kim et al. (2021) với độ chênh lệch $4,3$ mm/năm khi so sánh với phương pháp thủy chuẩn.

Biểu đồ Hình 14 có thể thấy tốc độ sụt lún đất được phân tích từ ảnh Sentinel-1 tương đồng 78% ($R^2 \approx 0,78$) so với dữ liệu tốc độ sụt lún đất khi đo

đặc thực địa. Sai số xảy ra do sự ảnh hưởng của phương pháp đo đặc thực địa, phương pháp chỉ đo đặc độ lệch tương đối giữa nền móng công trình với bề mặt đất ở hai thời điểm khác nhau, nhưng không hiệu chỉnh độ sụt lún của bản thân công trình do đó có sự sai lệch về tốc độ sụt lún đất khi đo đặc thực

địa. Chính vì thế, để khẳng định thêm về độ tin cậy của phương pháp PSInSAR, nghiên cứu tiếp tục thực hiện đánh giá tương quan giữa dữ liệu sụt lún đất được phân tích từ ảnh Sentinel-1 với dữ liệu sụt lún đất được thu thập từ tổ chức GIZ, BGR và BKK, kết quả này được trình bày trong mục tiếp theo.



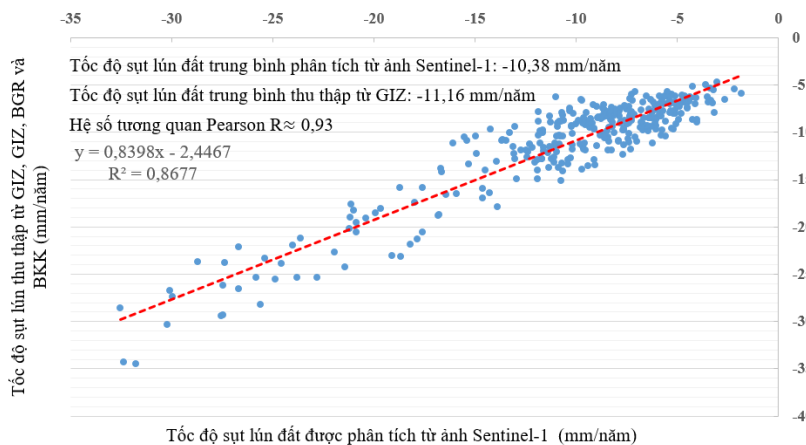
Hình 14. Tương quan giữa tốc độ sụt lún đất được phân tích từ ảnh Sentinel-1 với tốc độ sụt lún đất đo đặc thực địa tại các điểm khảo sát

3.4.2. *Kết quả đánh giá tương quan giữa dữ liệu sụt lún đất được phân tích từ ảnh Sentinel-1 với dữ liệu được thu thập từ GIZ, BGR và BKK*

Kết quả đánh giá tương quan giữa dữ liệu sụt lún đất được phân tích từ ảnh Sentinel-1 với dữ liệu được thu thập từ tổ chức GIZ, BGR và BKK cho thấy có sự tương quan rất cao với hệ số tương quan Pearson $R \approx 0,93$. Bên cạnh, nếu xem xét tốc độ sụt lún đất trung bình của 2 bộ dữ liệu này thì cũng có sự tương đồng với kết quả phân tích từ ảnh Sentinel-

1 là -10,38 mm/năm (độ lệch chuẩn $\pm 6,0$ mm) và kết quả được thu thập từ GIZ, BGR và BKK là -11,16 mm/năm (độ lệch chuẩn $\pm 5,4$ mm), được thể hiện trong Hình 15.

Nghiên cứu cũng cho thấy có sự tương đồng 86,77% ($R^2 \approx 0,8677$) giữa kết quả phân tích và dữ liệu thu thập được. Đồng thời đã xác định được phương trình tương quan tuyến tính của hai bộ dữ liệu này là $y = 0,8398x - 2,4467$, trong đó y là tốc độ sụt lún được thu thập và x là tốc độ sụt lún được phân tích từ ảnh Sentinel-1.



Hình 15. Tương quan giữa tốc độ sụt lún đất được phân tích từ ảnh Sentinel-1 với tốc độ sụt lún đất được thu thập từ GIZ, BGR và BKK

Kết quả nghiên cứu giá trị sai số trung phương cho thấy tốc độ sụt lún đất được phân tích từ ảnh Sentinel-1 thấp hơn tốc độ sụt lún đất được thu thập từ GIZ, BGR và BKK là 2,3 mm/năm. Chính vì thế, phương pháp PSInSAR có khả năng giám sát hiện trạng sụt lún đất tại khu vực TP. Cần Thơ nói riêng và cả ĐBSCL nói chung, đặc biệt chính xác nhất tại các khu vực đô thị như cầu đường, tòa nhà, công trình xây dựng.

4. KẾT LUẬN

Ứng dụng phương pháp PSInSAR trên nền tảng SNAP-StaMPS để phân tích sụt lún đất tại TP. Cần Thơ có độ tin cậy cao, với hệ số tương quan Pearson $R \approx 0,88$ khi so sánh với dữ liệu sụt lún đất khi đo đạc thực địa và hệ số tương quan Pearson $R \approx 0,93$ khi so sánh với dữ liệu sụt lún đất thu thập được từ GIZ, BGR và BKK. Qua đó cho thấy phương pháp sử dụng ảnh viễn thám radar trong giám sát sụt lún đất có khả năng ứng dụng cao.

Tốc độ sụt lún đất tại TP. Cần Thơ diễn ra nhanh, với tốc độ sụt lún đất trung bình -13,2 mm/năm và tốc độ sụt lún đất phổ biến nhất ~ -7 mm/năm. Đặc biệt, quận Ninh Kiều có tốc độ sụt lún đất diễn ra nhanh với tốc độ sụt lún đất trung bình -23,12 mm/năm và tốc độ sụt lún đất phổ biến nhất ~ -19 mm/năm.

Phương pháp PSInSAR có ưu điểm là có khả năng phân tích sụt lún đất với độ chính xác cao tại các khu vực ít có sự biến động như khu vực đô thị, công trình giao thông, đất trồng. Tuy nhiên, phương pháp PSInSAR có độ chính xác thấp tại các khu vực có nhiều biến động như đất nông nghiệp hoặc công trình mới xây dựng,... do không thể phân tích trực tiếp các điểm sụt lún đất nên cần thực hiện nội suy không gian để ước tính tốc độ sụt lún.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu gửi lời cảm ơn đến các tổ chức GIZ, BGR và BKK đã cung cấp dữ liệu sụt lún đất tại ĐBSCL cho nghiên cứu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Abidin, H. Z., Andreas, H., Gumilar, I., Fukuda, Y., Pohan, Y. E., & Deguchi, T. (2011). Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development. *Natural Hazards*, 59(3), 1753–1771. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9866-9>
- Aobpaet, A., Cuenca, M. C., Hooper, A., & Trisirisatayawong, I. (2013). InSAR time-series analysis of land subsidence in Bangkok, Thailand. *International Journal of Remote Sensing*, 34(8), 2969–2982. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.756596>
- Chen, Z., Zhang, L., & Zhang, G. (2016). An improved InSAR image co-registration method for pairs with relatively big distortions or large incoherent areas. *Sensors (Switzerland)*, 16(9). <https://doi.org/10.3390/s16091519>
- Chen, M., Tomàs, R., Li, Z., Motagh, M., Li, T., Hu, L., Gong, H., Li, X., Yu, J., & Gong, X. (2016). Imaging land subsidence induced by groundwater extraction in Beijing (China) using satellite radar interferometry. *Remote Sensing*, 8(6), 1–21. <https://doi.org/10.3390/rs8060468>
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthéry, N., & Crippa, B. (2016). Persistent scatterer interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011>
- Dang, V. K., Doubre, C., Weber, C., Gourmelen, N., & Masson, F. (2014). Recent land subsidence caused by the rapid urban development in the Hanoi region (Vietnam) using ALOS InSAR data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(3), 657–674. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-657-2014>
- Dinh, H. T. M. (2010). Monitoring land subsidence in Ho Chi Minh city using radar interferometry techniques subsidence in Ho Chi Minh city is a long term problem. *7th FIG Regional Conference, Ha Noi*.
- Dinh, H. T. M., Trung, L. V. & Thuy, L. T. (2015). Mapping ground subsidence phenomena in Ho Chi Minh city through the radar interferometry technique using ALOS PALSAR data. *Remote Sensing*, 7(7), 8543–8562. <https://doi.org/10.3390/rs70708543>
- Điệp, N. T. H., Minh, V. Q., Trường, P. N., Thành, L. K., & Vinh, T. L. Q. (2019). Diễn tiến tình hình sạt lở ven bờ sông Tiền và sông Hậu, vùng Đồng bằng sông Cửu Long. *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, 55 (Môi trường và Biến đổi khí hậu), 125-133. <https://doi.org/10.22144/ctu.jsi.2019.139>
- Kim, D. W., Bente, R. L., Esther, S., Olaf, N., Nils, D., Andreas S., & Philip, S. M. (2021). Identifying causes of urban differential subsidence in the Vietnamese mekong delta by combining insar and field observations. *Remote Sensing*, 13(2), 1–33. <https://doi.org/10.3390/rs13020189>
- Lợi, N. T., Tiên, N. T. C., Điệp, N. T. H., & Tuấn, V. Q. (2019). Ứng dụng ảnh vệ tinh Sentinel-2 trong đánh giá tình trạng sạt lở bờ sông Tiền và sông

- Hậu giai đoạn 2015 -2018. *Hội Thảo Ứng Dụng GIS Toàn Quốc*, 10.
- Lợi, N. T. (2021). *Đánh giá mối quan hệ giữa đô thị hóa và sụt lún đất tại TP. Long Xuyên, TP. Cà Mau và TP. Cần Thơ* (Luận văn thạc sĩ). Trường Đại học Cần Thơ.
- Mason, D. C., Speck, R., Devereux, B., Schumann, G. J. P., Neal, J. C., & Bates, P. D. (2010). Flood detection in urban areas using TerraSAR-X. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 48(2), 882–894. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2029236>
- Minderhoud, P. S. J., Coumou, L., Erban, L. E., Middelkoop, H., Stouthamer, E., & Addink, E. A. (2018). The relation between land use and subsidence in the Vietnamese Mekong delta. *Science of the Total Environment*, 634(July), 715–726. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.372>
- Minderhoud, Philip S.J., Hlavacova, I., Kolomaznik, J., & Olaf, N. (2020). Towards unraveling total subsidence of a mega-delta-the potential of new PS InSAR data for the Mekong delta. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 2019* (327–332). <https://doi.org/10.5194/piahs-382-327-2020>
- Olaf, N. (2019). *Vấn đề dưới mặt đất - sụt lún đất tại đồng bằng Sông Cửu Long*. Deutsche gesellschaft für internationale zusammenarbeit (GIZ).
- Orellana, F., Blasco, J. M. D., Foumelis, M., D'aranno, P. J. V., Marsella, M. A., & Mascio, P. Di. (2020). Dinsar for road infrastructure monitoring: Case study highway network of Rome Metropolitan (Italy). *Remote Sensing*, 12(22), 1–17. <https://doi.org/10.3390/rs12223697>
- Peltzer, G., Crampé, F., Hensley, S., & Rosen, P. (2001). Transient strain accumulation and fault interaction in the Eastern California shear zone. *Geology*, 29(11), 975–978. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0975:TSAAFI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0975:TSAAFI>2.0.CO;2)
- Phuong, Đ. T., (2017). *Nghiên cứu phương pháp nội suy ảnh viễn thám cho bài toán phân loại lớp phủ thực vật* (luận văn thạc sĩ). Đại học Quốc gia Hà Nội, trường Đại học Công nghệ.
- Salkind, N. J. (2000). Statistics for people who (think they) hate statistics. *Statistics in medicine - stat med*. <https://doi.org/10.1002/sim.1050>
- Stramondo, S., Bozzano, F., Marra, F., Wegmuller, U., Cinti, F. R., Moro, M., & Saroli, M. (2008). Subsidence induced by urbanisation in the city of Rome detected by advanced InSAR technique and geotechnical investigations. *Remote Sensing of Environment*, 112(6), 3160–3172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.008>
- Takagi, H., Thao, N. D. & Anh. L. T. (2016). Sea-level rise and land subsidence: Impacts on flood projections for the Mekong Delta's largest city. *Sustainability (Switzerland)*, 8(9), 1–15. <https://doi.org/10.3390/su8090959>
- Tre Altamira. (2018). *InSAR at a glance*. <https://site.tre-altamira.com/insar/>, Accessed on 05/04/2021.
- Trung, L. V., & Có, N. T. (2018). Đánh giá khả năng ứng dụng ảnh Sentinel-1 trong giám sát lún mặt đất tại thành phố Hồ Chí Minh. *Tạp chí Phát triển Khoa học & Công nghệ: Chuyên san Khoa học Trái đất & Môi trường*, 2(2), 19–25.
- Tỷ, T. V., & Hiệp, H. V. (2017). Hiện trạng khai thác nước dưới đất và mối tương quan giữa hạ thấp cao độ mực nước và sụt lún đất: nghiên cứu tại Trà Vinh và thành phố Cần Thơ. *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, 1(Môi trường và Biến đổi khí hậu), 128-136. <https://doi.org/10.22144/ctu.jsi.2017.03>