

**MÔ HÌNH HÓA DIỄN BIẾN LÚN CỦA CÔNG TRÌNH
TẠI KHU CÔNG NGHIỆP ĐÌNH VŨ - HẢI PHÒNG THEO MÔ HÌNH
CHUỖI THỜI GIAN PHỤC VỤ PHÂN TÍCH VÀ DỰ BÁO LÚN
MODELING THE SETTLEMENT DEVELOPMENT OF STRUCTURES
AT DINH VU INDUSTRIAL ZONE - HAI PHONG USING A TIME SERIES
MODEL FOR SETTLEMENT ANALYSIS AND PREDICTION**

Nguyễn Văn Nghĩa¹, Trần Đức Cường²

^{1,2}*Viện Khoa học công nghệ xây dựng*

Email: ¹*nvngia96@gmail.com*, 0326 142 357, ²*tdcuongibst@gmail.com*, 0912 777 350

DOI: <https://doi.org/10.59382/hnkh17-ibst.2025.ses3-10>

TÓM TẮT: Bài báo trình bày phương pháp dự báo độ lún của công trình xây dựng tại khu công nghiệp Đình Vũ - Hải Phòng dựa trên mô hình chuỗi thời gian. Phương pháp phân tích hồi quy được sử dụng với hàm đa thức nhằm xây dựng mô hình mô phỏng diễn biến lún theo dữ liệu quan trắc thực tế. Kết quả nghiên cứu cho thấy mô hình hồi quy đa thức phản ánh tương đối chính xác quy luật lún và có khả năng dự báo xu hướng lún trong tương lai, góp phần hỗ trợ công tác thiết kế, thi công và quản lý an toàn công trình trên nền đất yếu.

TỪ KHÓA: Dự báo lún, Hồi quy đa thức, Chuỗi thời gian, Công trình trên nền đất yếu, Đình Vũ - Hải Phòng.

ABSTRACT: This paper presents a method for predicting the settlement of construction works at the Dinh Vu Industrial Zone - Hai Phong based on a time series model. Regression analysis using polynomial functions is applied to develop a settlement model from actual monitoring data. The results indicate that the polynomial regression model can accurately reflect settlement behavior and reliably predict future settlement trends, thereby supporting the design, construction, and safety management of structures on soft ground.

KEYWORDS: Settlement prediction, Polynomial regression, Time series, Soft ground structures, Dinh Vu - Hai Phong.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong xây dựng công trình, đặc biệt là các dự án thi công trên nền đất yếu, quan trắc lún luôn được xem là một nhiệm vụ bắt buộc và có ý nghĩa quyết định đối với chất lượng, tiến độ cũng như tuổi thọ công trình. Thông qua công tác quan trắc, các kỹ sư có thể xác định được độ lún tại từng thời điểm, kiểm chứng lại các kết quả dự báo trong giai đoạn thiết kế, đồng thời phát hiện kịp thời những dấu hiệu bất thường như lún lệch, tốc độ lún không đồng đều, hoặc các khu vực có giá trị lún vượt ngưỡng cho phép. Đây chính là cơ sở quan trọng để đưa ra các biện pháp xử lý, đảm bảo an toàn và tính ổn định cho công trình.

Tuy nhiên, thực tiễn cho thấy phần lớn các báo cáo quan trắc hiện nay mới chỉ dừng lại ở việc phản ánh hiện trạng, tức là mô tả “cái đã xảy ra”, mà chưa đi sâu vào dự báo lún trong tương lai. Việc thiếu

vắng nội dung dự báo không chỉ làm cho báo cáo chưa toàn diện, mà còn hạn chế khả năng hỗ trợ ra quyết định cho chủ đầu tư, nhà thầu và đơn vị quản lý vận hành. Khi không có dự báo, các bên liên quan buộc phải đối mặt với rủi ro cao hơn trong việc lập kế hoạch thi công, xử lý nền và khai thác công trình. Điều này đồng nghĩa với việc các báo cáo quan trắc chưa thực sự phát huy hết vai trò là một công cụ quản lý kỹ thuật chuyên nghiệp.

Xuất phát từ những hạn chế trên, nhóm tác giả đã tập trung nghiên cứu và đề xuất mô hình hóa diễn biến lún công trình theo phương pháp chuỗi thời gian kết hợp phân tích hồi quy đa thức. Khác với cách tiếp cận truyền thống, mô hình này không chỉ mô phỏng sát quá trình lún trên cơ sở dữ liệu quan trắc mà còn cung cấp khả năng dự báo xu hướng lún trong tương lai với độ tin cậy cao. Điều này mang lại hai giá trị nổi bật:

- Giá trị khoa học: Bổ sung cơ sở lý thuyết cho việc ứng dụng các mô hình toán học trong địa kỹ thuật, đặc biệt là trong bài toán dự báo lún công trình trên nền đất yếu.

- Giá trị thực tiễn: Nâng tầm báo cáo quan trắc từ việc chỉ phản ánh số liệu sang một công cụ phân tích - dự báo, phục vụ trực tiếp cho việc ra quyết định của chủ đầu tư và các bên liên quan.

Không chỉ dừng lại ở việc nâng cao chất lượng kỹ thuật, việc tích hợp nội dung dự báo vào báo cáo quan trắc còn giúp đơn vị thực hiện tạo ra sự khác biệt rõ rệt so với các đối thủ cạnh tranh trên thị trường. Trong bối cảnh đấu thầu ngày càng khốc liệt, một báo cáo quan trắc chuyên nghiệp, toàn diện và có giá trị dự báo sẽ trở thành lợi thế cạnh tranh chiến lược, khẳng định uy tín và năng lực của đơn vị cung cấp dịch vụ.

Với cách tiếp cận mới mẻ này, nghiên cứu không chỉ đóng góp vào lĩnh vực khoa học kỹ thuật xây dựng mà còn có ý nghĩa thực tiễn sâu sắc, hướng đến mục tiêu quản lý công trình một cách chủ động, an toàn và bền vững.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Hiện tượng lún công trình trên nền đất yếu

Lún công trình trên nền đất yếu là một quá trình biến dạng không hồi phục của đất nền dưới tác dụng tải trọng, thường bao gồm hai giai đoạn chính:

- Lún tức thời (Immediate Settlement): Xảy ra ngay khi tải trọng được tác dụng, chủ yếu do biến dạng đàn hồi của đất.

- Lún cố kết (Consolidation Settlement): Diễn biến theo thời gian, gắn liền với quá trình thoát nước lỗ rỗng và tái phân bố ứng suất trong đất nền.

Trong thực tế, lún cố kết chiếm tỷ trọng lớn và có ảnh hưởng quyết định đến độ bền vững, ổn định và tuổi thọ công trình. Do đó, việc nghiên cứu và dự báo diễn biến lún là yêu cầu tất yếu trong khảo sát, thiết kế và thi công công trình trên nền đất yếu.

2.2. Quan trắc lún và vai trò của mô hình toán học

Công tác quan trắc lún là khâu không thể thiếu trong thi công và khai thác công trình trên nền đất yếu, bởi nó cung cấp chuỗi số liệu theo thời gian, phản ánh chân thực diễn biến biến dạng nền móng. Tuy nhiên, số liệu quan trắc chỉ cho thấy hiện trạng tại những mốc thời gian nhất định, chưa đủ để trả lời câu hỏi quan trọng nhất đối với nhà quản lý và kỹ sư: quá trình lún sẽ tiếp diễn như thế nào trong tương lai? Chính khoảng trống này khiến cho việc

dự báo xu thế lún trở thành nhu cầu tất yếu nhằm chủ động kiểm soát rủi ro, tối ưu tiến độ thi công và lựa chọn giải pháp xử lý phù hợp.

Để đáp ứng yêu cầu đó, nhiều mô hình toán học đã được phát triển và ứng dụng, biến dữ liệu quan trắc rời rạc thành công cụ dự báo hữu hiệu. Trong số đó, bốn phương pháp được nghiên cứu và áp dụng phổ biến nhất hiện nay gồm: mô hình Asaoka, mô hình Hyperbolic, mô hình hàm số mũ và mô hình hồi quy đa thức. Mỗi phương pháp có cơ sở lý thuyết, ưu điểm và hạn chế riêng, nhưng tựu trung đều hướng tới mục tiêu nâng cao độ tin cậy trong dự báo lún, biến kết quả quan trắc từ “bức tranh quá khứ” thành tầm nhìn tương lai cho công trình.

a. Hàm Asaoka (Asaoka method)

Phương pháp Asaoka dựa trên hồi quy giữa độ lún tại hai chu kỳ liên tiếp ($S_{t_i}, S_{t_{i-1}}$), từ đó ngoại suy đến giá trị lún cuối cùng S_∞ . Mô hình được biểu diễn đơn giản qua quan hệ:

$$S_{t_i} = \beta_0 + \beta_1 \cdot S_{t_{i-1}}$$

Trong đó:

t_i - thời gian quan trắc;

$S_{t_i}, S_{t_{i-1}}$ - độ lún tại thời điểm t_i , và t_{i-1} ;

β_0, β_1 - là các hệ số hồi quy.

- Ưu điểm: Rất đơn giản, dễ triển khai bằng Excel hoặc tính tay; thích hợp khi dữ liệu quan trắc hạn chế; đã trở thành phương pháp tiêu chuẩn trong nhiều dự án.

- Nhược điểm: Không có biến thời gian t , do đó không xác định được thời điểm đạt tới các mốc lún quan trọng. Độ tin cậy giảm khi dữ liệu còn nhiều hoặc chưa ổn định. Thường chỉ phù hợp làm công cụ ước lượng lún cuối cùng, cần kết hợp phương pháp khác để dự báo theo thời gian.

b. Hàm Hyperbolic (Tan - Inoue - Lee, 1991)

Phương pháp Hyperbolic mô tả quá trình lún theo công thức:

$$S_{t_i} = S_0 + \frac{t_i}{\alpha + \beta \cdot t_i}$$

Trong đó:

t_i - thời gian quan trắc;

S_0 - độ lún ở thời điểm ban đầu khi chất đủ tải;

$S_{t_{i-1}}$ - độ lún tại thời điểm quan trắc i ;

α, β - các hệ số hồi quy của hàm.

- Ưu điểm: Có biến thời gian rõ ràng, thuận tiện dự báo giá trị lún tại mốc thời điểm cụ thể. Đặc biệt phù hợp với quá trình cố kết trong đất sét mềm khi đường cong lún tuân dạng hyperbolic.

- Nhược điểm: Yêu cầu dữ liệu đủ dài để hình thành xu hướng tuyến tính; với dữ liệu ít hoặc nhiều, sai số lớn. Một số nghiên cứu cho thấy phương pháp này không ổn định trên nhiều loại đất khác nhau.

c. Hàm số mũ (Exponential curve fitting)

Mô hình dạng mũ mô tả đặc trưng giảm tốc của lún theo thời gian, ví dụ:

$$S_{t_i} = S_c \cdot (1 - \alpha \cdot e^{-\beta \cdot t_i})$$

Trong đó:

S_{t_i} - độ lún tại thời điểm quan trắc i ;

S_c - là độ lún cố kết;

α, β - các hệ số hồi quy của hàm.

• Ưu điểm: Có ý nghĩa vật lý hợp lý, phản ánh xu hướng giảm tốc độ lún theo thời gian; có thể mô tả tiệm cận ổn định.

• Nhược điểm: Cần tối ưu phi tuyến để ước lượng tham số, nhạy cảm với nhiễu và dữ liệu ngắn. Nhiều thực nghiệm cho thấy sai số lớn hơn so với Asaoka hoặc đa thức, đặc biệt trong dữ liệu thực địa.

d. Hàm đa thức (Polynomial regression)

Hồi quy đa thức mô tả trực tiếp độ lún theo thời gian:

$$S_{t_i} = a_0 + a_1 \cdot t_i + a_2 \cdot t_i^2 + \dots + a_m \cdot t_i^m$$

Trong đó:

t_i - thời gian quan trắc;

$a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ - các hệ số của hàm.

Trong thực tế, đa thức bậc 2 - 3 thường cho kết quả cân bằng giữa độ phù hợp và tránh được hiện tượng quá khớp dữ liệu.

- Ưu điểm: Có biến thời gian, dự báo trực tiếp theo mốc thời gian; Linh hoạt (đa thức bậc 2 - 3 mô tả tốt xu hướng lún); dễ áp dụng bằng hồi quy tuyến tính thông thường; Dễ áp dụng, dễ lập trình phần mềm (Excel, R, Python); Linh hoạt trong phân tích và dễ tích hợp vào phần mềm báo cáo tự động; Được nhiều nghiên cứu thực nghiệm chứng minh hiệu quả.

- Nhược điểm: Nếu chọn bậc quá cao dễ dẫn đến mô hình có thể khớp quá mức với dữ liệu quan trắc không phản ánh tốt khi dữ liệu có biến động phi tuyến bất thường. Do đó, cần kiểm tra chéo, chuẩn hoá dữ liệu và loại bỏ outlier.

3. KẾT LUẬN LỰA CHỌN

Qua phân tích so sánh bốn phương pháp dự báo lún, có thể thấy: hàm Asaoka nổi bật nhờ tính đơn giản và dễ triển khai, song lại thiếu biến thời gian, dẫn đến hạn chế trong việc xác định thời điểm lún cụ thể. Hàm Hyperbolic và hàm số mũ mang tính vật lý, có cơ sở lý thuyết rõ ràng, tuy nhiên đòi hỏi dữ liệu quan trắc “chuẩn” và ổn định, đồng thời nhạy cảm với nhiễu, khiến kết quả dự báo trong thực tế dễ sai lệch. Trái lại, hồi quy đa thức cho thấy ưu thế nổi bật: linh hoạt trong mô hình hóa, có biến thời gian rõ ràng, dễ dàng triển khai bằng các công cụ tính toán và phần mềm, đồng thời đã được nhiều nghiên cứu thực nghiệm chứng minh là phù hợp và hiệu quả trong điều kiện nền đất yếu ở Việt Nam.

Bảng 1: Bảng so sánh tổng hợp 4 phương pháp

Tiêu chí	Asaoka	Hyperbolic	Hàm số mũ	Hàm đa thức
Biến thời gian	Không có, chỉ quan hệ giữa chu kỳ	Có, $S(t)$ rõ ràng	Có, dạng mũ theo thời gian	Có, dạng đa thức theo thời gian
Độ chính xác	Tốt khi dữ liệu ổn định, nhiễu ít	Tốt trong đất sét mềm, nhưng hạn chế loại đất khác	Có thể sai số lớn với dữ liệu nhiễu	Cao, linh hoạt, phù hợp nhiều trường hợp
Độ phức tạp	Rất đơn giản, dễ tính	Trung bình, cần đủ dữ liệu tuyến tính	Khá phức tạp, cần hồi quy phi tuyến	Đơn giản, chỉ cần hồi quy tuyến tính
Tính ứng dụng	Ước lượng lún cuối cùng, không dự báo theo thời gian	Phù hợp khi có dạng hyperbolic rõ	Có cơ sở vật lý nhưng nhạy với dữ liệu	Dễ triển khai, dễ phần mềm hóa, ứng dụng rộng rãi

Do đó, trong bối cảnh dự báo lún cho công trình nhà xưởng UWG tại Khu công nghiệp Đình Vũ - Hải Phòng, việc lựa chọn mô hình hồi quy đa thức bậc 2 - 3 được xem là giải pháp tối ưu. Phương pháp này không chỉ đảm bảo tính khoa học và độ tin cậy trong dự báo, mà còn đáp ứng yêu cầu thực tiễn về khả năng dự báo theo thời gian, dễ dàng ứng dụng trong công tác quản lý và thi công xây dựng trên nền đất yếu.



Hình 1: Hình ảnh nhà xưởng UWG

Trường hợp nghiên cứu cụ thể là Nhà kho Công ty Cổ phần Liên hợp Kho bãi UWG, tọa lạc tại lô đất CN4.1M, KCN Đình Vũ, thuộc Khu kinh tế Đình Vũ - Cát Hải, phường Đông Hải 2, quận Hải An, thành phố Hải Phòng. Công trình có quy mô 70 m × 80 m (tương đương 5.600 m²), bao gồm các hạng mục:

- Nhà kho chính
- Khu văn phòng
- Hạ tầng kỹ thuật phụ trợ

Công trình đã được hoàn thành và đưa vào sử dụng từ năm 2021, nằm tiếp giáp dự án USI hiện đang thi công phần móng cọc. Tuy nhiên, qua phản ánh của đơn vị sử dụng và khảo sát sơ bộ tại hiện trường, đã ghi nhận hiện tượng suy giảm chất lượng công trình với các dấu hiệu đáng chú ý:



Hình 2: Khu vực tiếp giáp với dự án đang thi công



Hình 3: Một số hình ảnh suy giảm chất lượng trong và ngoài công trình

- Xuất hiện vết nứt tại tường đầu hồi.
- Các vết nứt chạy dọc nền nhà xưởng.
- Hiện tượng thấm nước từ bên ngoài vào công trình.
- Bề mặt nền đường giao thông bằng nhựa bị trồi sụt cục bộ.

Những dấu hiệu trên cho thấy nền móng và kết cấu công trình có nguy cơ tiếp tục biến dạng và suy giảm chất lượng nếu không có giải pháp xử lý kịp thời. Do vậy, cần tiến hành đánh giá chi tiết hiện trạng kỹ thuật công trình, đồng thời theo dõi diễn

biến lún trong giai đoạn tới cho đến khi công trình ổn định. Trên cơ sở kết quả quan trắc và phân tích, nhóm nghiên cứu sẽ đề xuất các biện pháp xử lý phù hợp, nhằm đảm bảo an toàn kết cấu, duy trì công năng sử dụng bình thường và kéo dài tuổi thọ công trình cho đơn vị khai thác.

4. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM MÔ HÌNH HÓA DIỄN BIẾN LÚN CỦA CÔNG TRÌNH NHÀ XƯỞNG UWG

4.1. Mục đích thực nghiệm

Thực tiễn cho thấy, phần lớn các báo cáo quan trắc hiện nay mới chỉ dừng lại ở việc phản ánh hiện trạng, tức là mô tả “cái đã xảy ra”, mà chưa chú trọng đến khả năng dự báo lún trong tương lai. Sự thiếu vắng nội dung dự báo khiến báo cáo chưa toàn diện, làm hạn chế vai trò hỗ trợ ra quyết định cho chủ đầu tư, nhà thầu và đơn vị quản lý vận hành. Khi không có dự báo, các bên liên quan phải đối mặt với nhiều rủi ro hơn trong việc lập kế hoạch thi công, lựa chọn giải pháp xử lý nền và đảm bảo an toàn khai thác công trình. Điều này đồng nghĩa với việc báo cáo quan trắc chưa phát huy hết vai trò là một công cụ quản lý kỹ thuật chuyên nghiệp.

Xuất phát từ những hạn chế trên, nhóm tác giả đặt mục tiêu xây dựng mô hình hóa diễn biến lún công trình Nhà xưởng UWG tại KCN Đình Vũ - Hải Phòng dựa trên phương pháp chuỗi thời gian kết hợp hồi quy đa thức. Khác với cách tiếp cận truyền thống, mô hình này vừa mô phỏng sát thực tế quá trình lún từ số liệu quan trắc, vừa cung cấp khả năng dự báo xu hướng lún trong tương lai với độ tin cậy cao.

Mục đích cốt lõi của thực nghiệm là:

- Xác định giá trị độ lún trong tương lai dựa trên chuỗi số liệu quan trắc đã có.
- Cung cấp cái nhìn tổng thể về diễn biến lún trong quá khứ, hiện tại và tương lai.
- Tạo sự chủ động cho công tác thi công, xử lý nền và quản lý công trình.
- Đối chiếu, kiểm chứng các kết quả dự báo trong bước thiết kế.
- Cảnh báo kịp thời các nguy cơ do lún lệch, đảm bảo an toàn công trình.
- Hỗ trợ lập kế hoạch quan trắc cho các chu kỳ tiếp theo một cách khoa học và hiệu quả hơn.
- Xây dựng bộ báo cáo quan trắc lún toàn diện - hiện đại - chuẩn mực, không chỉ phản ánh hiện trạng mà còn tích hợp phân tích xu hướng, dự báo tương lai và khuyến nghị giải pháp. Bộ báo cáo này sẽ trở thành công cụ quản lý kỹ thuật tiên tiến, phục vụ đồng thời cho chủ đầu tư, nhà thầu, đơn vị thiết kế và cơ quan quản lý nhà nước, góp phần nâng cao.

4.2. Kết quả tính toán thực nghiệm

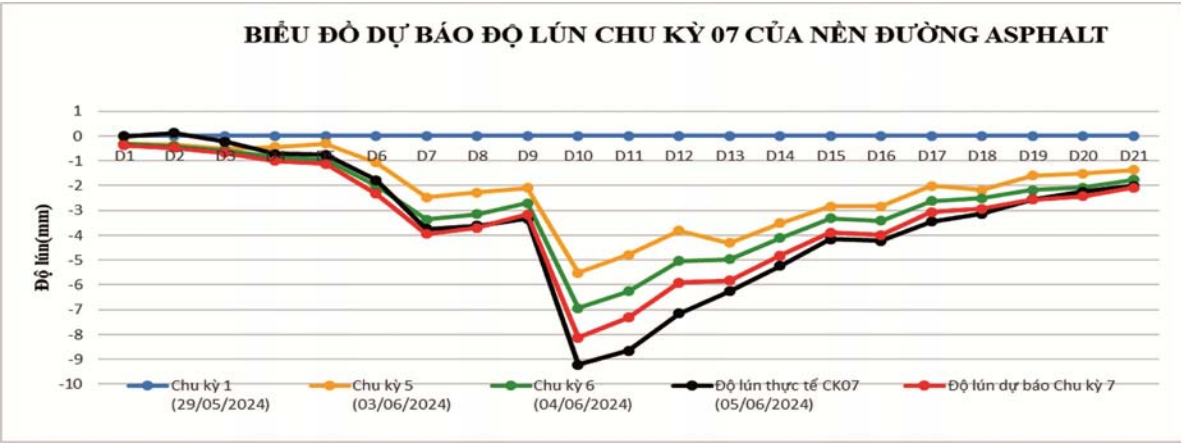
SO SÁNH ĐỐI CHIẾU THỰC TẾ SỐ LIỆU DỰ BÁO LÚN
(Dự báo độ lún chu kỳ 07 dựa trên số liệu chu kỳ 01, 02, 03, 04, 05 và 06)

4.2.1. Nền đường asphalt

a. Bảng giá trị dự báo độ lún chu kỳ 07 nền đường asphalt

STT	Tên điểm	Độ lún CK07 theo độ lún trung bình	Độ lún CK07 theo tốc độ lún	Độ lún dự báo CK07	Độ lún thực tế CK07 (05/06/2024)	Độ lệch	Ghi chú
1	D1	-0,38	-0,37	-0,37	-0,01	0,36	
2	D2	-0,48	-0,46	-0,47	0,12	0,59	
3	D3	-0,68	-0,65	-0,67	-0,23	0,44	
4	D4	-1,02	-0,97	-1,00	-0,72	0,28	
5	D5	-1,15	-1,10	-1,12	-0,76	0,36	
6	D6	-2,39	-2,27	-2,33	-1,78	0,55	
7	D7	-4,04	-3,85	-3,95	-3,74	0,21	
8	D8	-3,78	-3,60	-3,69	-3,62	0,07	
9	D9	-3,24	-3,09	-3,16	-3,33	-0,17	
10	D10	-8,32	-7,92	-8,12	-9,22	-1,10	
11	D11	-7,50	-7,14	-7,32	-8,65	-1,33	
12	D12	-6,05	-5,76	-5,90	-7,15	-1,25	
13	D13	-5,96	-5,68	-5,82	-6,26	-0,44	
14	D14	-4,93	-4,70	-4,81	-5,24	-0,43	
15	D15	-3,98	-3,79	-3,89	-4,16	-0,27	
16	D16	-4,09	-3,90	-3,99	-4,22	-0,23	
17	D17	-3,14	-2,99	-3,07	-3,44	-0,37	
18	D18	-3,01	-2,87	-2,94	-3,14	-0,20	
19	D19	-2,62	-2,49	-2,55	-2,55	0,00	
20	D20	-2,48	-2,37	-2,42	-2,24	0,18	
21	D21	-2,12	-2,02	-2,07	-2,01	0,06	

b. Biểu đồ dự báo

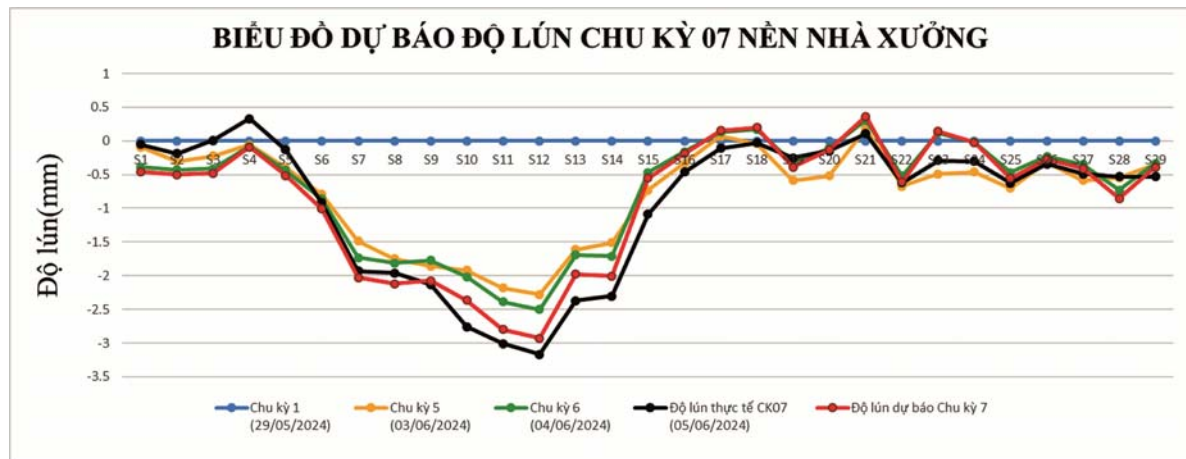


4.2.2. Nền nhà xưởng

a. Bảng giá trị dự báo độ lún chu kỳ 07 nền nhà xưởng

STT	Tên điểm	Độ lún CK07 theo độ lún trung bình	Độ lún CK07 theo tốc độ lún	Độ lún dự báo CK07	Độ lún thực tế CK07 (05/06/2024)	Độ lệch	Ghi chú
1	S1	-0,47	-0,45	-0,46	-0,05	0,41	
2	S2	-0,52	-0,49	-0,50	-0,19	0,31	
3	S3	-0,49	-0,47	-0,48	0,01	0,49	
4	S4	-0,10	-0,09	-0,09	0,33	0,42	
5	S5	-0,53	-0,50	-0,52	-0,13	0,39	
6	S6	-1,03	-0,98	-1,01	-0,92	0,09	
7	S7	-2,08	-1,98	-2,03	-1,93	0,10	
8	S8	-2,17	-2,07	-2,12	-1,96	0,16	
9	S9	-2,12	-2,02	-2,07	-2,13	-0,06	
10	S10	-2,42	-2,31	-2,37	-2,76	-0,39	
11	S11	-2,87	-2,73	-2,80	-3,01	-0,21	
12	S12	-3,00	-2,86	-2,93	-3,17	-0,24	
13	S13	-2,03	-1,93	-1,98	-2,37	-0,39	
14	S14	-2,05	-1,95	-2,00	-2,30	-0,30	
15	S15	-0,56	-0,54	-0,55	-1,09	-0,54	
16	S16	-0,19	-0,18	-0,19	-0,46	-0,27	
17	S17	0,16	0,15	0,15	-0,11	-0,26	
18	S18	0,20	0,19	0,20	-0,03	-0,23	
19	S19	-0,40	-0,38	-0,39	-0,25	0,14	
20	S20	-0,13	-0,13	-0,13	-0,15	-0,02	
21	S21	0,37	0,35	0,36	0,11	-0,25	
22	S22	-0,62	-0,59	-0,61	-0,62	-0,01	
23	S23	0,14	0,14	0,14	-0,29	-0,43	
24	S24	-0,02	-0,02	-0,02	-0,30	-0,28	
25	S25	-0,56	-0,54	-0,55	-0,63	-0,08	
26	S26	-0,28	-0,26	-0,27	-0,34	-0,07	
27	S27	-0,42	-0,40	-0,41	-0,49	-0,08	
28	S28	-0,88	-0,83	-0,86	-0,53	0,33	
29	S29	-0,40	-0,38	-0,39	-0,53	-0,14	

b. Biểu đồ dự báo



5. KẾT LUẬN

- Quan trắc, xử lý số liệu và dự báo lún công trình là khâu then chốt trong toàn bộ quá trình theo dõi biến dạng nền móng. Nếu như số liệu quan trắc truyền thống chỉ phản ánh những gì đã xảy ra, thì việc tích hợp dự báo mang lại một bức tranh toàn diện hơn về quá khứ - hiện tại - tương lai của công trình. Nhờ đó, chủ đầu tư, nhà thầu và đơn vị quản lý vận hành có thể chủ động xây dựng kế hoạch thi công, đưa ra biện pháp xử lý kịp thời và kiểm soát rủi ro hiệu quả, đảm bảo an toàn cho công trình trong suốt vòng đời khai thác.

- Kết quả nghiên cứu khẳng định rằng phương pháp hồi quy đa thức là công cụ hữu hiệu để mô hình hóa và dự báo diễn biến lún trên nền đất yếu. Các thực nghiệm cho thấy mô hình đa thức bậc 2 - 3 có khả năng mô tả chính xác xu hướng biến dạng, trong khi mô hình bậc cao hơn (như bậc 4) có thể cho kết quả khớp tốt với dữ liệu nhưng tiềm ẩn nguy cơ quá khớp dữ liệu. Do đó, việc xác định bậc đa thức tối ưu cần được kiểm chứng thêm qua nhiều công trình khác nhau nhằm đảm bảo tính khái quát và độ tin cậy.

- Nghiên cứu này không chỉ chứng minh hiệu quả của mô hình hồi quy đa thức trong dự báo lún công trình tại Khu công nghiệp Đình Vũ - Hải Phòng, mà còn gợi mở hướng tiếp cận mới cho công tác quan trắc ở Việt Nam. Việc xây dựng một bộ báo cáo quan trắc lún toàn diện, hiện đại, chuẩn mực, tích hợp cả phân tích và dự báo, sẽ trở thành công cụ quản lý kỹ thuật tiên tiến.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Phạm Quốc Khánh (2018), *Nghiên cứu phương pháp dự báo chuyển dịch biến dạng công trình theo mô hình động*, Báo cáo tổng kết đề tài NCKH cấp cơ sở năm 2017, mã số : T17-44, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội.
- [2] Trần Khánh, Nguyễn Quang Phúc (2010), *Quan trắc chuyển dịch và biến dạng công trình*, Nhà xuất bản Giao thông vận tải, Hà Nội.
- [3] Lê Đức Tình (2011), *Nghiên cứu giải pháp nâng cao hiệu quả công tác quan trắc biến dạng công trình ở Việt Nam*, Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội.
- [4] Ngô Văn Hoi (2010). *Đánh giá độ cố kết của đất yếu thông qua các kết quả quan trắc lún bằng phương pháp trắc địa*. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, 3, 44-48
- [5] Lê Đức Tình (2007). *Nghiên cứu thuật toán xử lý số liệu quan trắc và phân tích chuyển dịch biến dạng công trình*. Luận văn Thạc sĩ Kỹ thuật.
- [6] Trần Ngọc Đông (2014). *Nghiên cứu phương pháp trắc địa quan trắc, phân tích biến dạng nền móng và tăng hầm công trình nhà cao tầng trong giai đoạn thi công xây dựng*. Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội.
- [7] Phạm Quốc Khánh và Nguyễn Việt Hà (2015). *Ứng dụng phương pháp tự hồi quy trong dự báo lún công trình*. Tạp chí Công nghiệp Mỏ, 1, 57-60.