Journal of Mining and Earth Sciences
Website: http://jmes.humg.edu.vn

A novel approach of determining the parameters of Asadi profiling function for predictiong ground subsidence due to inclied coal seam mining at Quang Ninh coal basin

Long Quoc Nguyen *

Faculty of Geomatics and Land Administration, Hanoi University of Mining and Geology, Vietnam

ARTICLE INFO

Article history:
Received 12th Feb. 2019
Revised 16th Mar. 2020
Accepted 29th Apr. 2020

Keywords:
Asadi profiling function,
Inclined seam,
Parameter estimation,
Quang Ninh coal basin
Subsidence prediction.

ABSTRACT

In this paper, a novel approach for estimating preliminary values of parameters of the Asadi profiling function (APF) were proposed, then the least-squares principle was used with these preliminary values and ground subsidence monitoring data at the Thong Nhat underground mine to determine to the final parameters of the APF. This function was performed to predict ground subsidence at the Mong Duong mine where there are similar characteristics of coal seam to those in Thong Nhat mine such as: geological, rock geomachenial, and seams' inclination. The results show that the Root Mean Square Error (RMSE) and Mean Absolute Error (MAE) equal to 0.081 m and 0.055 m or 9.9% and 6.7% of maximum subsidence, respectively, and a correlation coefficient of 0.973. These results prove that the APF with calculated parameters can be used to predict ground subsidence due to underground mining in the areas that have the similar conditions to Thong Nhat mine.

Copyright © 2020 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author
E-mail: nguyenquoclong@humg.edu.vn
DOI: 10.46326/JMES.2020.61(2).10

Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất
Trang điện tử: http://tapchi.humg.edu.vn

Xác định các hệ số mô hình dự báo lún Asadi phù hợp đặc điểm khai thác vỉa dốc tại bể than Quảng Ninh

Nguyễn Quốc Long *

Khoa Trắc địa - Bản đồ và Quản lý đất đai, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:
Nhận bài 12/02/2020
Sửa xong 16/3/2020
Chấp nhận đăng 29/4/2020

Từ khóa:
Bể than Quảng Ninh;
Mô hình dự báo lún;
Mô hình Asadi;
Vỉa dốc;
Xác định hệ số.

TÓM TẮT

Bài báo đề xuất công thức tổng quát tính trị số gần đúng của các hệ số mô hình dự báo lún Asadi. Dựa trên các trị gần đúng và số liệu quan trắc lún bề mặt do khai thác than hầm lò tại mỏ Thống Nhất, áp dụng nguyên lý số bình phương nhỏ nhất để xác định các hệ số của mô hình. Sử dụng mô hình này dự báo độ lún bề mặt do khai thác tại mỏ than Mông Dương, đây là mỏ hầm lò có điều kiện địa chất, tính chất cơ lý đất đá cũng như độ dốc của vỉa khá tương đồng với mỏ Thống Nhất. Kết quả dự báo được so sánh với số liệu quan trắc để đánh giá độ chính xác của mô hình. Từ kết quả đánh giá độ chính xác cho thấy sai số trung phương RMSE = 0,081 m, sai số trung bình MAE = 0,055 m lần lượt tương đương 9,9% và 6,7% độ lún cực đại của bồn dịch chuyển, tương quan r = 0,973. Với các kết quả trên cho phép khẳng định mô hình Asadi với các hệ số đề xuất phù hợp để dự báo lún bề mặt do khai thác hầm lò các khu vực có các điều kiện tương tự mỏ Thống Nhất.

© 2020 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

1. Mở đầu

Quy luật, cường độ và quá trình dịch chuyển đất đá cũng như biến dạng bề mặt chịu sự chi phối của đặc điểm địa hình, địa chất, thế nằm của vỉa, tính chất cơ lý của các lớp địa tầng và công nghệ khai thác khoáng sản,... (Reddish and Whittaker, 2012). Tuy nhiên, các yếu tố kể trên đều được phản ánh thông qua kết quả quan trắc. Do đó, kết quả quan trắc đối với từng mỏ khác nhau, hoặc từng khu vực của một mỏ có thể sử dụng như đầu vào để xây dựng các mô hình dự báo thích hợp với từng điều kiện cụ thể, qua đó cho phép xác định sớm các quy luật và đại lượng dịch chuyển biến dạng, làm cơ sở cho việc lựa chọn công nghệ và kỹ thuật khai thác phù hợp, các biện pháp gia cố công trình,... nhằm mục đích ngăn ngừa và giảm thiểu ảnh hưởng tiêu cực của quá trình khai thác mỏ đối với các công trình (Nguyễn Quốc Long & Lê Văn Cảnh, 2018). Trong 5 đại lượng biến dạng bao gồm: độ lún (dịch chuyển đứng), dịch chuyển ngang, biến dạng ngang, độ nghiêng và độ cong địa hình thì độ lún là đại lượng cơ sở để xác định các đại lượng còn lại (Nguyễn Quốc Long, 2019). Vì vậy, các nghiên cứu về dự báo dịch chuyển biến dạng do khai thác hầm lò hầu hết tập trung nghiên cứu đối tượng chính là dự báo đại lượng lún. Hiện nay, có nhiều phương pháp, nhóm phương pháp dự báo lún bề mặt mỏ do ảnh hưởng của khai thác hầm lò, mỗi phương pháp, nhóm phương pháp đều có ưu điểm, nhược điểm và điều kiện ứng dụng thích hợp, tiêu biểu có các phương pháp

*Tác giả liên hệ
E - mail: nguyenquoclong@humg.edu.vn
DOI: 10.46326/JMES.2020.61(2).10

được đề xuất bởi các nhà khoa học Nga, Ba Lan, Trung Quốc, Anh (Agnieszka nnk., 2018; Nguyen Quoc Long nnk., 2012). Một số công nghệ hiện đại như InSAR, GNSS cũng được áp dụng trong thu thập dữ liệu lún tại các khu vực khai thác (Chen nnk., 2018; Hejmanowski nnk., 2019; Yu nnk., 2014). Tại Việt Nam, đã có một số nghiên cứu về dự báo lún bề mặt và phạm vi ảnh hưởng của khai thác hầm lò trên bề mặt được tiến hành tại bể than Quảng Ninh, các nghiên cứu này áp dụng mô hình dự báo Knothe và phương pháp Vùng tương tự. (Nguyen, 2016; Nguyen nnk., 2018; Pham nnk., 2019).

Theo Quy phạm kỹ thuật khai thác hầm lò than và diệp thạch (Bộ công nghiệp, 2006), thế nằm của vỉa than tại Việt Nam hầu hết là vỉa nghiêng và dốc nghiêng (sau đây gọi chung là vỉa dốc), bên cạnh đó dữ liệu quan trắc được bố trí theo dạng tuyến (Nguyễn Quốc Long, 2019) nên nhóm phương pháp hàm mặt cắt là phù hợp để dự báo lún bề mặt trong điều kiện của Việt Nam. Trong nhóm phương pháp này, mô hình do Asadi đề xuất cho phép dự báo lún trong phạm vi bồn dịch chuyển khi khai thác vỉa dốc (Asadi nnk., 2005). Asadi đề xuất mô hình xác định mặt cắt bồn dịch chuyển trong trường hợp khai thác vỉa dốc bằng cách kết hợp hai hàm mặt cắt dạng mũ, ưu điểm của phương pháp này không chỉ là được phát triển trên cơ sở lý thuyết Knothe được công nhận rộng khắp mà trước hết ở tính chặt chẽ về lý thuyết. Để mô hình Asadi dự báo chính xác, phù hợp với điều kiện mỏ - địa chất của từng khu vực cần phải xác định các hệ số của mô hình tương ứng với từng khu vực cụ thể. Các hệ số này có thể được xác định thông qua số liệu quan trắc thực địa.

Nghiên cứu này được tiến hành tại các mỏ Thống Nhất và Mông Dương, đây là các mỏ hầm lò tiêu biểu tại Việt Nam và có các điều kiện về địa chất mỏ, địa chất công trình và góc dốc của vỉa than khá tương đồng (Trúc, 1991; Trung tâm hỗ trợ phát triển khoa học kỹ thuật, 2017). Số liệu quan trắc tại mỏ Thống Nhất được dùng để xác định các hệ số mô hình Asadi, mô hình này được kiểm chứng bằng cách so sánh kết quả dự báo với số liệu quan trắc tại mỏ Mông Dương.

2. Mô hình Asadi dự báo lún bề mặt do khai thác hầm lò vỉa dốc

Khác với vỉa bằng và dốc thoải, trong trường hợp vỉa dốc, quá trình khai thác sẽ tạo ra bồn dịch chuyển bất đối xứng. Chính vì vậy, việc dự báo lún bề mặt khi khai thác vỉa dốc luôn phức tạp hơn so với vỉa bằng (Nguyễn Quốc Long, 2015).

Dựa trên hàm dự báo lún bề mặt của Knothe cho trường hợp vỉa bằng, Asadi đã đề xuất hai hàm mặt cắt riêng biệt để dự báo độ lún cho hai nửa mặt cắt phía xuôi dốc và ngược dốc của bồn dịch chuyển. Hai nửa mặt cắt này được kết hợp lại với nhau thành một hàm thống nhất dự báo đường cong lún qua mặt cắt chính của bồn dịch chuyển như biểu thức (1) (Asadi và nnk., 2004).

$$\eta^{p}{}_{(s_i)} = \eta_{max}.\left[c.e^{-f\left(\frac{-s}{L_1}\right)^{g}} + d.e^{-p\left(\frac{s}{L_2}\right)^{q}}\right] \quad (1)$$

Trong đó: $\eta^{p}{}_{(s_i)}$ là giá trị độ lún của điểm cần xác định trên mặt cắt chính bồn dịch chuyển; η_{max} là độ lún cực đại của bồn dịch chuyển; s là khoảng cách từ điểm có độ lún cực đại (tâm bồn dịch chuyển) tới điểm cần tính, s mang giá trị âm (-) đối với các điểm ở phía ngược dốc và dương (+) đối với các điểm ở phía xuôi dốc của bồn dịch chuyển; L_1 và L_2 lần lượt là bán bồn dịch chuyển theo hướng ngược và xuôi dốc, các tham số này được xác định dựa trên kết quả quan trắc hoặc trên các bản vẽ mặt cắt; Các hệ số f, g, p, q của mô hình được xác định thông qua kết quả quan trắc thực địa; c và d là các hệ số điều kiện để kết nối hai nửa mặt cắt của bồn dịch chuyển thành 1 đường cong liền.

3. Phương pháp xác định các hệ số của mô hình dự báo

3.1. Xác định trị gần đúng của các hệ số

Trong mô hình dự báo Asadi, độ lún dự báo được tính theo biểu thức (1). Giá trị các hệ số f, g, p, q có thể được xác định dựa vào số liệu quan trắc.

Ký hiệu $\eta_{(s_i)}$ là giá trị quan trắc; $V_{(s_i)}$ là giá trị hiệu chỉnh, theo nguyên lý số bình phương nhỏ nhất ta có:

$$\eta_{(s_i)} + V_{(s_i)} = \eta_{max}.\left[c.e^{-f\left(\frac{-s}{L_1}\right)^{g}} + d.e^{-p\left(\frac{s}{L_2}\right)^{q}}\right] \quad (2)$$

Hệ phương trình số hiệu chỉnh (2) là loại hàm phi tuyến, cho nên khi áp dụng nguyên lý số bình phương nhỏ nhất, giải pháp thông dụng là đưa hàm này về dạng tuyến tính. Với mục đích này, trước hết, biểu diễn các hệ số f, g, p, q qua trị gần đúng f^0, g^0, p^0, q^0 và số hiệu chỉnh tương ứng:

$$\begin{cases} f = f^0 + \delta f \\ g = g^0 + \delta g \\ p = p^0 + \delta p \\ q = q^0 + \delta q \end{cases} \quad (3)$$

Để xác định giá trị gần đúng f^0, g^0, p^0, q^0, tiến hành đạo hàm riêng từng phần theo các biến f, g, p, q. Từ biểu thức (2), lấy logarit tự nhiên hai vế theo từng biến, ta có:

$$ln[\eta_{(s_i)}] = ln\,\eta_{max} + ln\,C - f\left(\frac{-s}{L_1}\right)^g$$

$$\Rightarrow \left(\frac{-s}{L_1}\right)^g = -\frac{ln[\eta_{(s_i)}] - ln\,\eta_{max} - ln\,C}{f} \quad (4)$$

Áp dụng biểu thức (5) cho 2 giá trị bất kỳ tại vị trí i và i+1 (s_i<0, s_{i+1}<0) trong chuỗi số liệu đo, sau đó chia hai biểu thức đó cho nhau ta được:

$$\frac{(-S_i/L_1)^{g^0}}{(-S_{i+1}/L_1)^{g^0}} = \frac{ln[\eta_{(s_i)}] - ln(\eta_{max}) - ln(c)}{ln[\eta_{(s_{i+1})}] - ln(\eta_{max}) - ln(c)} \quad (5)$$

Từ đó tính được giá trị gần đúng của g là g^0 theo công thức:

$$g^0 = log_{s_i/s_{i+1}}\left[\frac{ln[\eta_{(s_i)}] - ln(\eta_{max}) - ln\,c}{ln[\eta_{(s_{i+1})}] - ln(\eta_{max}) - ln\,c}\right] \quad (6)$$

Thay g^0 vào biểu thức (5) tính được giá trị gần đúng của f là:

$$f^0 = -\frac{ln[\eta_{(s_i)}] - ln(\eta_{max})}{-(S_i/L_1)^{g^0}} \quad (7)$$

Cũng với cách làm tương tự có thể tính được giá trị gần đúng của q^0 và p^0 tương ứng với hai giá trị bất kỳ tại vị trí k và $k+1$ ($s_k > 0, s_{k+1} > 0$) như sau:

$$q^0 = log_{\frac{s_k}{s_{k+1}}}\left[\frac{ln[\eta_{(s_k)}] - ln(\eta_{max}) - ln\,d}{ln[\eta_{(s_{k+1})}] - ln(\eta_{max}) - ln\,d}\right] \quad (8)$$

$$p^0 = \frac{ln[\eta_{(s_k)}] - ln(\eta_{max})}{(S_k/L_2)^{q^0}} \quad (9)$$

3.2. Xác định hệ số của mô hình

Nếu các trị gần đúng của ẩn số được xác định xấp xỉ với giá trị chuẩn của chúng thì các số hiệu chỉnh của các ẩn số sẽ là những giá trị nhỏ, khi đó ta có thể khai triển các hàm $\eta^p{}_{(s_i)}$ theo chuỗi Taylor và chỉ giữ lại các số hạng bậc nhất của *δf, δg, δp, δq*. Sau khi khai triển ta có phương trình dạng tuyến tính (10):

$$V_{(\eta_{s_i})} = \eta^{p0}{}_{(s_i)}(f^0, g^0, p^0, q^0) + \left(\frac{\partial\eta_{(s_i)}}{\partial_f}\right)_0 \delta_f + \left(\frac{\partial\eta_{(s_i)}}{\partial_g}\right)_0 \delta_g + \left(\frac{\partial\eta_{(s_i)}}{\partial_p}\right)_0 \delta_p \left(\frac{\partial\eta_{(s_i)}}{\partial_q}\right)_0 \delta_q - \eta_{(s_i)} \quad (10)$$

Trong đó:

$$\frac{\partial\eta_{(s_i)}}{\partial_f} = -\eta_{max}.c.\left(\frac{-S_i}{L_1}\right)^g . e^{-f\left(\frac{-S_i}{L_1}\right)^g} \quad (11a)$$

$$\frac{\partial\eta_{(s_i)}}{\partial_g} = -\eta_{max}.c.f.\left(\frac{-S_i}{L_1}\right)^g . ln\left(\frac{-S_i}{L_1}\right) e^{-f\left(\frac{-S_i}{L_1}\right)^g} \quad (11b)$$

$$\frac{\partial\eta_{(s_i)}}{\partial_p} = -\eta_{max}.d.\left(\frac{S_i}{L_2}\right)^q . e^{-p\left(\frac{S_i}{L_2}\right)^q} \quad (11c)$$

$$\frac{\partial\eta_{(s_i)}}{\partial_q} = -\eta_{max}.d.p.\left(\frac{S_i}{L_2}\right)^q . ln\left(\frac{S_i}{L_2}\right) e^{-p\left(\frac{S_i}{L_2}\right)^q} \quad (11d)$$

Ký hiệu số hạng tự do:

$$\ell_i = \eta^{p0}{}_{(s_i)}(f^0, g^0, p^0, q^0) - \eta_{(s_i)} \quad (12)$$

Kết hợp các biểu thức (11a÷11d) và (12), biểu thức (10) có thể được viết lại như sau:

$$V_{\eta_{s_i}} = \left(\frac{\partial\eta_{(s_i)}}{\partial_f}\right)_0 \delta_f + \left(\frac{\partial\eta_{(s_i)}}{\partial_g}\right)_0 \delta_g + \left(\frac{\partial\eta_{(s_i)}}{\partial_p}\right)_0 \delta_p + \left(\frac{\partial\eta_{(s_i)}}{\partial_q}\right)_0 \delta_q + L_i \quad (13)$$

Ký hiệu hệ số của phương trình số hiệu chỉnh là $\left(\frac{\partial\eta_{(s_i)}}{\partial_{f,g,p,q}}\right)_0 = a_{ij}$ với j=1, 2, 3, 4 tương ứng với các ẩn số $\delta_f, \delta_g, \delta_p, \delta_q$, khi đó, ta sẽ được phương trình số hiệu chỉnh dạng tuyến tính, phương trình này còn gọi là phương trình sai số và có thể mô tả tổng quát dưới dạng ma trận như sau:

$$V = A.X + L \quad (14)$$

Trong đó: A là ma trận hệ số, V là véc tơ số hiệu chỉnh, L là véc tơ số hạng tự do, X là véc tơ ẩn số với:

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} & a_{1,4} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} & a_{2,4} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & a_{n,3} & a_{n,4} \end{bmatrix};$$

$$V=\begin{bmatrix}V_1\\V_2\\\dots\\V_n\end{bmatrix};\ L=\begin{bmatrix}\ell_1\\\ell_2\\\dots\\\ell_4\end{bmatrix};\ X=\begin{bmatrix}\delta_f\\\delta_g\\\delta_p\\\delta_q\end{bmatrix}$$

Từ các phương trình số hiệu chỉnh (14) ta lập được hệ phương trình chuẩn (15). Nghiệm của hệ phương trình (15) chính là véc tơ số hiệu chỉnh của ẩn số và được xác định theo (16).

$$(A^TA)X + (A^TL) = 0 \quad (15)$$

$$X=-(A^TA)^{-1}.(A^TL) \quad (16)$$

Thay các giá trị X ($\delta f, \delta g, \delta p, \delta q$) nhận được từ (16) và các giá trị gần đúng của các hệ số tương ứng nhận được từ các công thức (11a), (11b), (11c) và (11d), giá trị bốn hệ số của mô hình dự báo Asadi được tính theo biểu thức (3).

4. Đánh giá độ chính xác kết quả dự báo

Độ chính xác của kết quả dự báo được xác định thông qua các giá trị độ lệch (Δ_i); sai số trung bình (MAE); sai số trung phương (RMSE) và tương quan (r) giữa giá trị độ lún quan trắc và dự báo như các công thức (17), (18), (19) và (20) (Chai & Draxler, 2014; Salazar nnk., 2017).

$$\Delta_i=\eta^p{}_{(s_i)} - \eta_{(s_i)} \quad (17)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\eta_i - \eta_i^p)^2} \quad (18)$$

$$MAE = \sum_{i=1}^{n}\left|\eta_i - \eta_i^p\right|/n \quad (19)$$

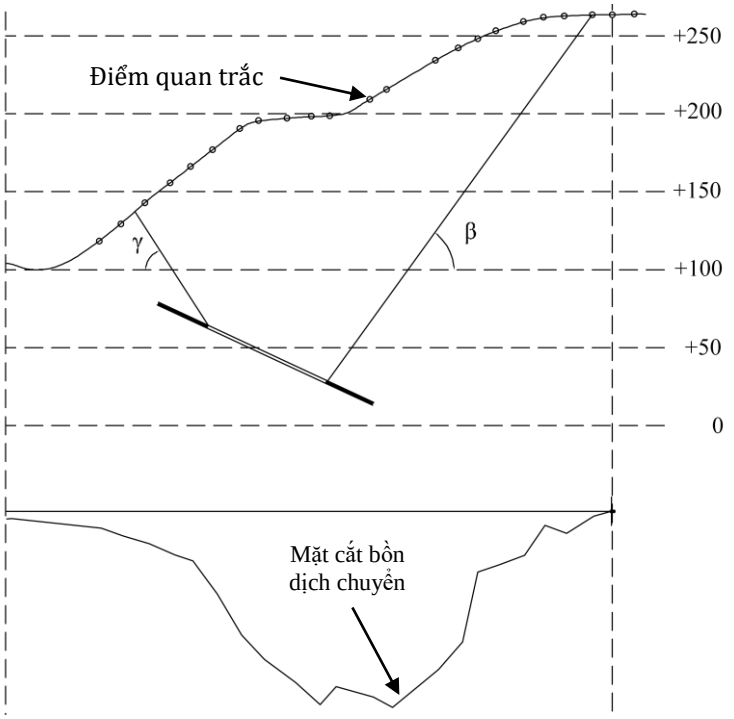
$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\eta_i - \overline{\eta_i})\left(\eta_i^p - \overline{\eta_i^p}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(\eta_i - \overline{\eta_i})^2 * \sum_{i=1}^{n}\left(\eta_i^p - \overline{\eta_i^p}\right)^2}} \quad (20)$$

Trong đó: r - hệ số tương quan; η_i và η_i^p - tương ứng là giá trị quan trắc và giá trị dự báo của điểm thứ i; $\overline{\eta_i}$ và $\overline{\eta_i^p}$ - tương ứng là giá trị trung bình của trị quan trắc và trị dự báo.

5. Xây dựng mô hình dự báo lún do khai thác hầm lò tại mỏ Thống Nhất

Mỏ Thống Nhất nằm ở phía bắc thành phố Cẩm Phả, tỉnh Quảng Ninh, có diện tích khoảng 5,5 km^2. Phía bắc mỏ giáp khoáng sàng than Khe Chàm, Khe Tam, phía đông giáp mỏ than Đèo Nai, phía nam giáp thị xã Cẩm Phả, phía tây giáp khoáng sàng Khe Sim.

Số liệu quan trắc tại mỏ than Thống Nhất dùng để xây dựng mô hình dự báo được lấy từ tuyến D vuông góc với phương vỉa. Khoảng cách giữa các mốc là 10÷30 m, tổng thời gian quan trắc là 11 chu kỳ, mỗi chu kỳ trung bình cách nhau



Hình 1. Mặt cắt tuyến quan trắc D mỏ Thống Nhất.

3 tháng (Trúc, 1991). Mốc khống chế đầu tuyến được truyền độ cao theo tiêu chuẩn đo thủy chuẩn hạng IV. Mặt cắt tuyến quan trắc và biểu đồ độ lún tuyến *D* mỏ Thống Nhất như Hình 1.

Để xây dựng mô hình dự báo, trước hết cần xác định các thông số đầu vào của mô hình bao gồm: giá trị độ lún cực đại, các bán kính bồn dịch chuyển. Các thông số trên có thể ước tính dựa vào các thông số khác như góc dịch chuyển biên, góc lún cực đại, chiều dày vỉa và độ sâu khai thác. Trong trường hợp mỏ Thống Nhất, các thông số này được trình bày trên Bảng 1 (Trúc, 1991).

Bảng 1. Các thông số dịch động địa chất khai thác mỏ than Thống Nhất.

$\propto$ (độ)	β (độ)	γ (độ)	θ (độ)
22	60	75	72
m (m)	L (m)	H (m)	η_{max}(m)
2.5	80	140	1.386

Sử dụng số liệu quan trắc của 17 điểm trên tuyến để xác định 4 hệ số của mô hình, 6 điểm còn lại là các điểm D2, D5, D7, D11, D18 và D22 dùng để kiểm chứng độ chính của mô hình dự báo. Từ các dữ liệu quan trắc và các thông số địa chất - khai thác như trên Bảng 1, đã xác định giá trị bốn hệ số, cụ thể: f=6,46, g=2,75, p =4,50, q=1,82. Thay giá trị của các hệ số này vào biểu thức (1) ta được mô hình dự báo độ lún theo hướng dốc vỉa khai thác bề mặt mỏ Thống Nhất dưới dạng hàm mũ (21):

$$\eta_{(s)} = \eta_{max}.\left[c.e^{-6{,}46\left(\frac{-s}{L_1}\right)^{2{,}75}} + d.e^{-4{,}50\left(\frac{s}{L_2}\right)^{1{,}82}}\right] \quad (21)$$

Mô hình (21) cho phép xác định được độ lún của bất kỳ điểm nào trên mặt cắt chính theo hướng dốc của vỉa. Do đó, sử dụng mô hình này để tính lại giá trị độ lún cho 17 điểm dùng để xác định các hệ số nhằm đánh giá độ tin cậy của các hệ số tính được. Kết quả cho thấy sai số tính từ mô hình dự báo và kết quả quan trắc của 17 điểm này là nhỏ, với RMSE = 0,081 m, MAE = 0,061 m lần lượt tương đương 5,8% và 4,4% độ lún cực đại của bồn dịch chuyển. Kết quả tính lại độ lún của các điểm từ mô hình dự báo (21) cũng như giá trị độ lệch Δ_i, tương quan r và các sai số RMSE, MAE được trình bày trên Bảng 2. Từ các giá trị này có thể khẳng định các hệ số của mô hình đã được xác định chính xác. Nhằm đánh giá khả năng dự báo của mô hình (21), sử dụng mô hình này để dự báo độ lún cho các điểm D2, D5, D7, D11, D18 và D22, đây là các điểm không tham gia vào quá trình tính toán xác định hệ số của mô hình. Giá trị độ lún dự báo của các điểm này và sai số dự báo được trình bày trên Bảng 3.

Bảng 2. Đánh giá độ tin cậy của các hệ số.

Tên điểm	Độ lún thực tế $\eta_{(s_i)}$ (m)	Độ lún dự báo $\eta^p{}_{(s_i)}$ (m)	Độ lệch Δ_i (m)
D1	0	-0,002	0,002
D3	-0,175	-0,112	-0,063
D4	-0,230	-0,211	-0,019
D6	-0,35	-0,458	0,108
D8	-0,875	-0,836	-0,039
D9	-1,046	-1,004	-0,042
D10	-1,206	-1,187	-0,019
D12	-1,239	-1,339	0,100
D13	-1,311	-1,383	0,072
D14	-1,386	-1,386	0,000
D15	-1,116	-1,076	-0,040
D16	-0,923	-0,801	-0,122
D17	-0,429	-0,628	0,199
D19	-0,311	-0,239	-0,072
D20	-0,100	-0,138	0,038
D21	-0,155	-0,075	-0,080
D23	0	-0,015	0,015
RMSE (m)	0,081		
MAE (m)	0,061		
r	0,988		

Bảng 3. Đánh giá độ chính xác dự báo.

Tên điểm	Độ lún thực tế $\eta_{(s_i)}$, (m)	Độ lún dự báo $\eta^p{}_{(s_i)}$, (m)	Độ lệch Δ_i, (m)
D2	-0,120	-0,065	-0,055
D5	-0,307	-0,338	0,031
D7	-0,585	-0,648	0,063
D11	-1,365	-1,295	-0,070
D18	-0,370	-0,422	0,052
D22	-0,035	-0,031	-0,004
RMSE (m)	0,051		
MAE (m)	0,046		
r	0,994		

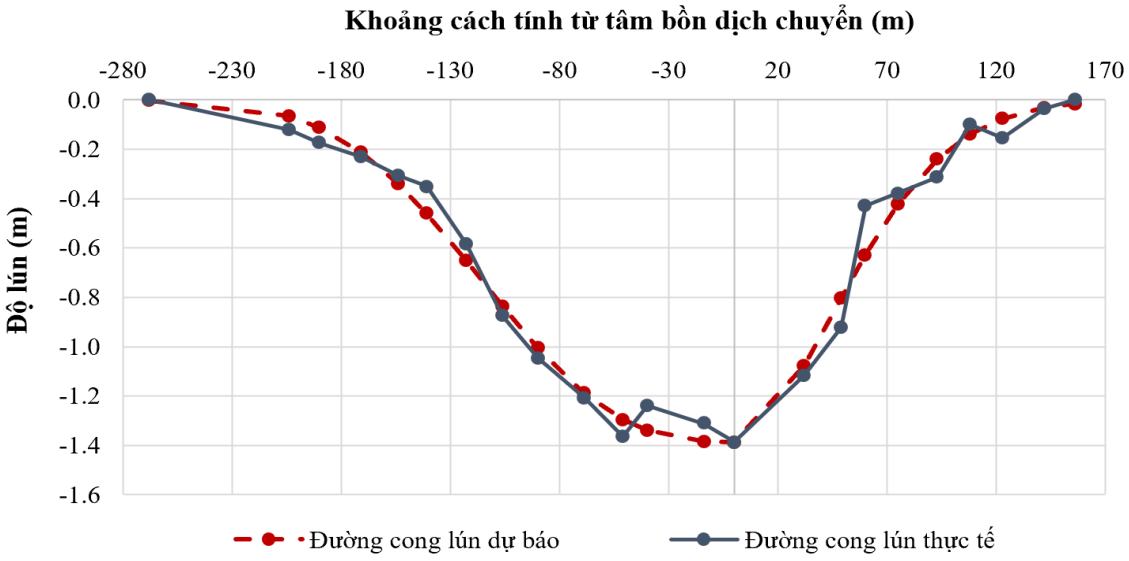
Tổng hợp kết quả trên Bảng 2 và Bảng 3 nhận thấy, tất cả có 19 trong tổng số 23 điểm có độ lệch nhỏ hơn ±0,100 m (nhỏ hơn 7,2% độ lún cực đại). Sai số RMSE và MAE tổng hợp cho toàn bộ 23 điểm trên tuyến *D* là 0,072 m và 0,057 m (tương đương

5,0% và 4,0% giá trị độ lún cực đại), tương quan *r* toàn tuyến = 0,996. Với kết quả độ lệch dự báo và quan trắc rất nhỏ có thể cho phép đánh giá mô hình dự báo (21) có tính phù hợp cao với kết quả quan trắc. Biểu đồ so sánh đường cong dự báo và đường cong lún quan trắc của tuyến *D* mỏ Thống Nhất như trên Hình 2, biểu đồ thể hiện sự tương quan của chúng như trên Hình 3.

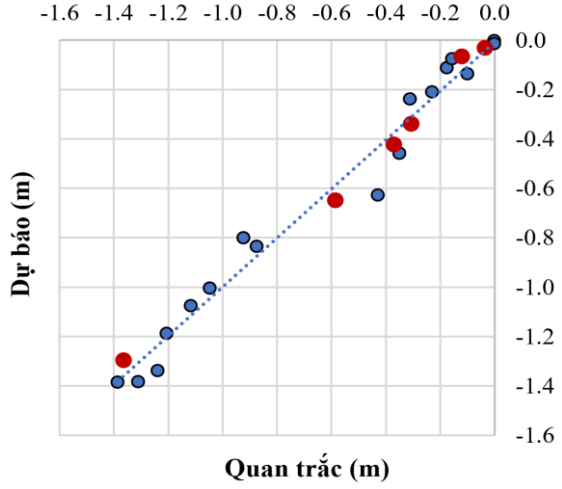
6. Ứng dụng mô hình dự báo (21) trong điều kiện mỏ Mông Dương

Mô hình (21) ở trên được thử nghiệm dự báo độ lún bề mặt do khác hầm lò tại mỏ Mông Dương, đây là mỏ có các điều kiện địa chất, khai thác tương tự như mỏ Thống Nhất. Đặc điểm địa chất - khai thác của khu vực nghiên cứu như sau: Chiều dày vỉa trung bình vỉa than *m* = 2,5 m, góc dốc vỉa trung bình α = 25 độ, các thông số địa chất - khai thác khác như độ lún cực đại, góc dịch chuyển biên, góc lún cực đại, bán kính bồn dịch chuyển, và độ sâu khai thác , ... được thể hiện trên Bảng 4 (Trung tâm hỗ trợ phát triển khoa học kỹ thuật, 2017).

Số liệu quan trắc sử dụng cho mục đích nghiên cứu được lấy từ tuyến D nằm trên khu vực lò chợ số 2 của Vỉa 9 khu Bắc Mông Dương. Lò chợ bắt đầu khai thác từ quý II năm 2013, đến quý II năm 2014 thì khai thác xong hoàn toàn. Tiếp đến kết quả dự báo này được so sánh với số liệu quan trắc để đánh giá độ chính xác dự báo của mô hình đề xuất.



Hình 2. So sánh đường cong lún thực tế và dự báo tuyến D mỏ Thống Nhất.



Hình 3. Tương quan giữa kết quả quan trắc và dự báo tuyến D mỏ Thống Nhất.

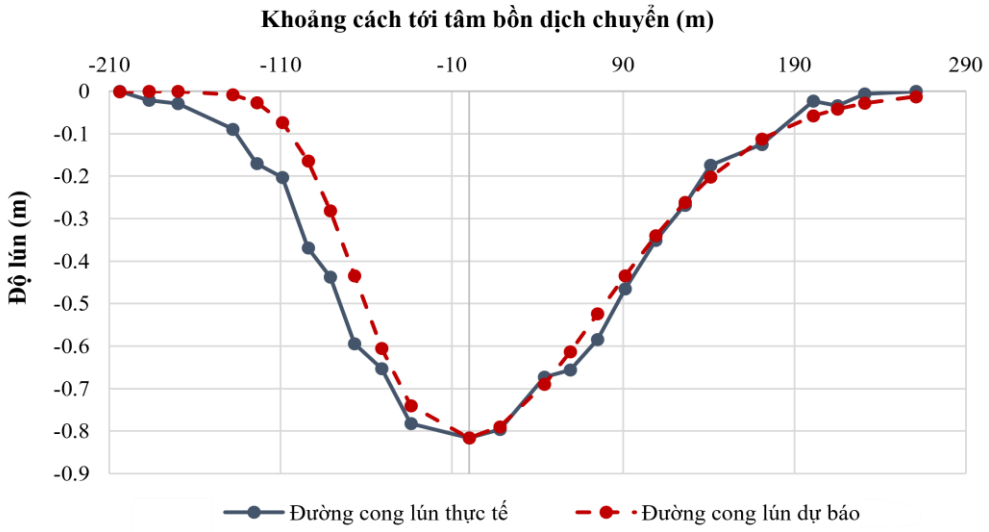
Sử dụng mô hình (21) để dự báo độ lún của tất cả các điểm trùng với các điểm quan trắc trên tuyến *D* mỏ Mông Dương. Kết quả dự báo được trình bày trên Bảng 4. Trên cơ sở độ lệch giữa giá trị độ lún quan trắc và giá trị dự báo từ mô hình của điểm tương ứng có thể đưa ra đánh giá độ chính xác của mô hình. Kết quả cho thấy sai số tính từ mô hình dự báo và kết quả quan trắc là nhỏ. Với sai số RMSE = 0,081 m, MAE = 0,055 m lần lượt tương đương 9,9% và 6,7% độ lún cực đại của bồn dịch chuyển. Kết quả dự báo độ lún của các điểm trên tuyến *D* mỏ Mông Dương cũng như giá trị độ lệch Δ_i và các chỉ số RMSE, MAE, r được thể hiện trên Bảng 5. Biểu đồ so sánh giữa đường cong độ lún thực tế và dự báo cũng như tương quan của chúng như trên các Hình 4, 5.

Bảng 4. Các tham số dịch động - địa chất - khai thác tuyến D mỏ Mông Dương.

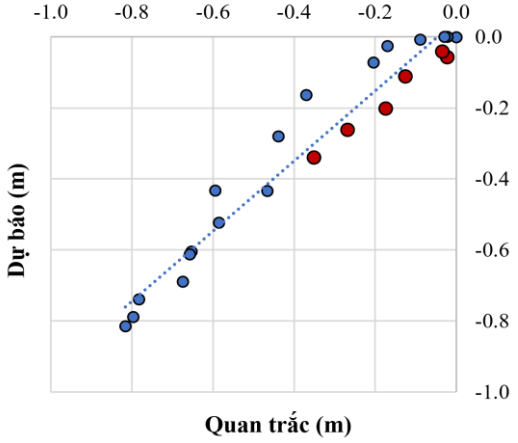
Thông số địa chất - khai thác									
α (độ)	β (độ)	γ (độ)	θ (độ)	m (m)	L (m)	H (m)	$L1$ (m)	$L2$ (m)	η_{max} (m)
25	45	65	60	2,5	190	110	204	261	0,816

Bảng 5. Kết quả dự báo và độ chính xác dự báo tuyến D mỏ Mông Dương.

Tên điểm	Độ lún thực tế $\eta_{(s_i)}$ (m)	Độ lún dự báo $\eta^p{}_{(s_i)}$ (m)	Độ lệch Δ_i (m)
D1	0	-0,001	0,001
D2	-0,021	0,000	-0,021
D3	-0,029	0,000	-0,029
D4	-0,089	-0,008	-0,081
D5	-0,17	-0,026	-0,144
D6	-0,203	-0,073	-0,130
D7	-0,369	-0,164	-0,205
D8	-0,437	-0,281	-0,156
D9	-0,594	-0,434	-0,160
D10	-0,653	-0,605	-0,048
D11	-0,782	-0,740	-0,042
D12	-0,816	-0,816	0,000
D13	-0,796	-0,790	-0,006
D14	-0,673	-0,690	0,017
D15	-0,656	-0,613	-0,043
D16	-0,584	-0,524	-0,060
D17	-0,465	-0,435	-0,030
D18	-0,351	-0,340	-0,011
D19	-0,268	-0,261	-0,007
D20	-0,174	-0,202	0,028
D21	-0,125	-0,112	-0,013
D22	-0,023	-0,058	0,035
D23	-0,034	-0,042	0,008
D24	-0,006	-0,028	0,022
D25	0	-0,013	0,013
RMSE (m)	0,081		
MAE (m)	0,055		
r	0,973		



Hình 4. So sánh đường cong lún thực tế và dự báo tuyến D mỏ Mông Dương.



Hình 5. Tương quan giữa kết quả quan trắc và dự báo tuyến D mỏ Mông Dương.

Với kết quả độ lệch giữa giá trị độ lún tính từ mô hình dự báo (21) và kết quả quan trắc rất nhỏ như trên, có thể đánh giá mô hình này có tính phù hợp với kết quả quan trắc tại mỏ than Mông Dương. Kết quả đánh giá độ chính xác cho phép khẳng định mô hình này có thể được áp dụng cho các vỉa than có điều kiện địa chất, khai thác tương tự.

7. Kết luận

Trong nghiên cứu này, giải pháp xác định các hệ số của mô hình Asadi trong dự báo lún bề mặt do khai thác vỉa dốc được đề xuất bảo đảm tính chặt chẽ về lý thuyết và đơn giản trong tính toán. Trên cơ sở lý thuyết của phương pháp Asadi và điều kiện cụ thể của mỏ than Thống nhất, áp dụng thuật giải đề xuất đã xác định được các các hệ số *f*, *g*, *p*, *q* của mô hình dự báo lún bề mặt theo hướng dốc của vỉa. Kết quả kiểm chứng mô hình theo dữ liệu thực tế tại mỏ Mông Dương có các điều kiện địa chất, khai thác tương tự mỏ Thống Nhất cho cho phép khẳng định độ chính xác của mô hình và độ tin cậy của phương pháp được đề xuất để ứng dụng cho các vỉa khai thác than dốc tại Việt Nam.

Tài liệu tham khảo

Agnieszka Malinowska, Ryszard Hejmanowski, Hua-yang Dai, (2020), Ground movements modeling applying adjusted influence function. *International Journal of Mining Science and Technology* 30 (1).

Asadi A., Shahriar K., Goshtasbi K., Najm K., (2005). Development of a new mathematical model for prediction of surface subsidence due to inclined coal-seam mining. *Journal of the*

South African Institute of Mining and Metallurgy 105 (1), 15-20.

Asadi A., Shakhriar K., Goshtasbi K., (2004). Profiling function for surface subsidence prediction in mining inclined coal seams. *Journal of Mining Science* 40 (2). 142-146.

Bộ công nghiệp, (2006). Quy phạm kỹ thuật khai thác hầm lò than và diệp thạch 18-TCN-5-2006.

Fernando Salazar, Rafael Morán, Miguel Á Toledo, Eugenio Oñate, (2017). Data-based models for the prediction of dam behaviour: a review and some methodological considerations. *Archives of Computational Methods in Engineering* 24 (1). 1-21.

Kiều Kim Trúc, (1991). Xác định các thông số dịch chuyển mặt đất khu Lộ Trí mỏ Thống Nhất và hiệu chỉnh trụ bảo vệ đường ô tô lên mỏ than Đèo Nai. *Viện nghiên cứu khoa học kỹ thuật mỏ*, Hà Nội.

Lei Chen, Liguo Zhang, Yixian Tang, Hong Zhang, (2018). Analysis of mining-induced subsidence prediction by exponent knothe model combined with insar and leveling. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*. 4 (3).

Long Quoc Nguyen, (2016). Sectional diagram of dynamic subsidence trough at the Mong Duong coal mine: evaluation and prediction. *Journal of Mining and Earth Sciences* 56. 58-66.

Long Quoc Nguyen, Adeel Ahmad, Cuong Xuan Cao, Canh Van Le, (2018). Designing observation lines: a case study of the G9 seam in the Mong Duong colliery. *Journal of Mining and Earth Sciences* 59 (6). 28-34.

Michał M Buczek, Nguyen Quoc Long, Xuan-Nam Bui, Nguyen Hoang, (2018). Application Of Knothe-Budryk Theory and Rigid Body Condition For Assessment of Subsidence, *Sustainable Development of Mountain Territories*. 10 (4). 595-605.

Nguyễn Quốc Long, (2015). Xây dựng hàm dự báo lún bề mặt do khai thác vỉa dốc tại mỏ than Thống Nhất. *Tạp chí Công nghiệp mỏ* 5, Hà Nội,

Nguyễn Quốc Long, (2019). Nghiên cứu phương pháp dự báo các đại lượng dịch chuyển đất đá và biến dạng bề mặt phù hợp với điều kiện khai thác hầm lò ở Việt Nam. *Luận án tiến sĩ kỹ thuật*. Đại học Mỏ-Địa chất, Hà Nội.

Nguyễn Quốc Long, Lê Văn Cảnh, (2018). Giải pháp xác định ranh giới vùng ảnh hưởng do khai thác hầm lò các vỉa than chưa tiến hành quan trắc. *Tạp chí Khoa học kỹ thuật Mỏ - Địa chất* 59. Hà Nội,

Nguyen Quoc Long, Vo Chi My, Bui Khac Luyen, (2016). Divergency verification of predicted values and monitored deformation indicators in specific condition of Thong Nhat underground coal mine (Vietnam). *Geoinformatica Polonica*. 15-22.

Pham Van Chung, Duong Thuy Huong, Cao Xuan Cuong, Nguyen Quoc Long, (2019), An initial assessment of the impact of coal mining on the Khe Cham washing plant (Vietnam). *International Journal of Scientific and Engineering Research* 10(4):914-922.

Reddish D. J., Whittaker B. N., (2012). Subsidence: occurrence, prediction and control. *Elsevier*, England.

Ryszard Hejmanowski, Agnieszka A. Malinowska, Wojciech T. Witkowski, Artur Guzy, (2019). An Analysis Applying InSAR of Subsidence Caused by Nearby Mining-Induced Earthquakes. *Geosciences* 9 (12). 490.

Tianfeng Chai, Roland R. Draxler, (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?-Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific model development* 7 (3). 1247-1250.

Trung tâm hỗ trợ phát triển khoa học kỹ thuật, (2017). Tính toán xác định ranh giới dịch chuyển và biến dạng trên bề mặt do khai thác các vỉa II.11, I.12, G9, H10 khu Vũ Môn và Cánh Đông mỏ than Mông Dương. *Trung tâm hỗ trợ phát triển khoa học kỹ thuật*, Hà Nội,

Xue Xiang Yu, Wei Cai Lü, Fa Wen Jiang, Hui Huang, Yu Fu Hang, Xu Yang, Ya Zhou Zhu, (2014). Research on the automatic monitoring system for coal mining subsidence. *Applied Mechanics and Materials* 644. 1355-1360.