



Journal of Mining and Earth Sciences

Website: <http://jmes.humg.edu.vn>



Forecasting oil production for Oligocene C sequence, X field, Cuu Long basin using logistic growth model



Ngan Thi Bui ^{1,*}, Anh Ngoc Le ¹, Muoi Duy Nguyen ¹, Hoa Minh Nguyen ¹, Oanh Thi Tran ²

¹ Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

² PetroVietnam University, Ba Ria - Vung Tau, Vietnam

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30th Sept. 2021

Revised 12th Jan. 2021

Accepted 05th Mar. 2022

Keywords:

History matching process,
Logistic growth model,
Production forecasting.

ABSTRACT

Hydrocarbon production forecasting for the field lifetime in the short and long term is an important phase, the accuracy of this process plays a tremendous role in giving the decision of reasonable field management and development. In this article, the logistic growth models using the function MATLAB's 'nlinfit' have been built to forecast oil production yield for the Oligocene C sequence, X field, Cuu Long basin. Thanks to the combination with the history matching process, the logistic growth model expressed high accuracy, the results of the model are very close to the actual production data with a relative error of 1,85%. The article analyzed and evaluated the production parameters of wells obtained when building logistic growth models such as the time at which half of the carrying capacity has been produced, the steepness of the decline of the rate, and the production rate of the wells at the forecast time. Without applying any improved oil recovery method, the decline of the rate of all wells approaches 100 bbl/d before reaching the validity period of the oil and gas contract. This is the basis for operators to establish and improve field development plans.

Copyright © 2022 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author

E - mail: buihingan@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2022.63(2).07



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: <http://tapchi.humg.edu.vn>

Dự báo khai thác dầu tầng chứa Oligoxen C, mỏ X, bể Cửu Long ứng dụng mô hình tăng trưởng logistic

Bùi Thị Ngân ^{1,*}, Lê Ngọc Ánh ¹, Nguyễn Duy Mười ¹, Nguyễn Minh Hòa ¹, Trần Thị Oanh ²

¹ Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

² Trường Đại học Dầu khí Việt Nam, Bà Rịa - Vũng Tàu, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

TÓM TẮT

Quá trình:

Nhận bài 30/9/2021

Sửa xong 12/01/2022

Chấp nhận đăng 05/3/2022

Từ khóa:

Dự báo khai thác,
Khớp lịch sử khai thác,
Mô hình tăng trưởng
logistic.

Dự báo sản lượng khai thác của các giếng khai thác trong ngắn hạn và dài hạn là một công tác quan trọng, sự chính xác của công tác dự báo có ý nghĩa to lớn trong các quyết định quản lý và phát triển khai thác mỏ hợp lý trong tương lai. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả xây dựng mô hình tăng trưởng logistic sử dụng hàm nlinfit trên phần mềm Matlab để dự báo sản lượng khai thác dầu đối với các giếng khai thác trong tầng chứa Oligoxen C thực nghiệm tại một mỏ thuộc bể Cửu Long. Qua quá trình khớp lịch sử khai thác cho thấy, sử dụng mô hình tăng trưởng logistic có độ tin cậy cao, kết quả của mô hình rất sát với dữ liệu khai thác thực tế với sai số tương đối là 1,85%. Bài báo phân tích, đánh giá các thông số của giếng khai thác thu được khi xây dựng mô hình tăng trưởng logistic như: thời điểm giếng khai thác được một nửa trữ lượng có thể thu hồi cuối cùng, tốc độ suy giảm lưu lượng trong suốt quá trình khai thác, lưu lượng của các giếng khai thác tại thời điểm dự báo. Kết quả dự báo cho thấy các giếng đều có lưu lượng suy giảm tới 100 thùng/ngày trước thời hạn của hợp đồng dầu khí nếu không có các biện pháp tác động để tăng lưu lượng khai thác. Đây là cơ sở giúp nhà điều hành lập và triển khai các phương án phát triển mỏ.

© 2022 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

1. Mở đầu

Một giai đoạn quan trọng trong kỹ thuật vỉa dầu khí là việc dự báo khai thác dầu khí chính xác và đáng tin cậy. Hiện nay, phương pháp phổ biến nhất trong dự báo khai thác thường được sử dụng

là các mô hình thực nghiệm truyền thống Arps (Arps, 1945). Tuy nhiên, qua nhiều nghiên cứu đã đưa ra kết luận không có bất cứ mô hình nào có thể áp dụng cho tất cả các giếng khai thác trên thế giới (Nguyễn và Lê, 2019). Với sự nghiên cứu thống kê sản lượng khai thác (SLKT) dầu hàng năm trong mối liên hệ với quy luật tăng trưởng theo mô hình logistic, bắt đầu từ Hubbert, ước tính tài nguyên và dự báo sản lượng dầu khí đã nhiều lần được thực hiện thông qua việc sử dụng các đường cong tăng trưởng logistic (Laherrefre,

*Tác giả liên hệ

E - mail: buihithingan@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2022.63(2).07

2000; 2002; 2004; Campbell and Heapes, 2008; Mohr and Evans, 2008). Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã nghiên cứu sử dụng hàm nlinfit được tích hợp trong bộ công cụ của Matlab để xây dựng mô hình tăng trưởng logistic dự báo khai thác dầu cho tầng chứa Oligoxen C, mỏ X tại bể Cửu Long.

2. Cơ sở lý thuyết về mô hình tăng trưởng logistic

2.1. Phương trình logistic

Có nhiều mô hình mô phỏng sự tăng trưởng của các hệ thống sinh học đã được nghiên cứu (Tsoularis và Wallace, 2002). Các mô hình hàm mũ có thể phản ánh đúng thực tế trong ngắn hạn, tuy nhiên mô hình sẽ không chính xác nếu sử dụng trong thời gian dài vì sự tăng trưởng theo cấp số nhân (hàm mũ) không thể tiếp tục mãi. Ví dụ, một nông dân chăm chỉ gieo 2 hạt mầm vào ngày đầu tiên và dự định tăng gấp đôi số hạt mầm mà anh ta gieo mỗi ngày trong một tháng. Đến cuối tháng, số hạt mầm mà anh ấy sẽ phải gieo là hơn 1 tỷ hạt mầm – một điều phi thực tế. Để đưa ra những phân tích và dự báo phù hợp với nhiều bài toán thực tế, một mô hình hàm mũ phải bắt đầu đạt đến một giá trị giới hạn và sau đó tốc độ tăng trưởng buộc phải chậm lại. Vì lý do này, mô hình có giới hạn trên – mô hình tăng trưởng logistic được sử dụng, thay vì mô hình tăng trưởng theo cấp số nhân. Tăng trưởng logistic mang một số điểm tương đồng với tăng trưởng theo cấp số nhân: ở giai đoạn ban đầu tăng trưởng xấp xỉ theo cấp số nhân, nhưng thay vì tăng mà không bị ràng buộc, khi bắt đầu bão hòa, tốc độ tăng trưởng sẽ chậm lại thành tuyến tính, ở giai đoạn cuối, tốc độ tăng trưởng sẽ dừng lại và mô hình sẽ tiệm cận một giá trị hữu hạn.

Phương trình tăng trưởng logistic đã được công bố lần đầu tiên vào năm 1838 bởi nhà toán học và nhân chủng học người Bỉ P.F. Verhulst để mô tả sự tăng trưởng tự giới hạn của dân số trong sinh học (Verhulst, 1838). Sau đó, phương trình logistic đã được sử dụng để mô hình hóa nhiều hệ thống sinh học đa dạng. Ngoài ra, cũng có những ứng dụng của phương trình logistic bên ngoài lĩnh vực sinh học như mô tả sự thâm nhập thị trường của nhiều sản phẩm và công nghệ mới; mô tả cuộc cách mạng công nghiệp với sự chuyển đổi tỉ lệ lực lượng lao động trong nông nghiệp và công

nghiệp,... Phương trình tăng trưởng logistic tổng quát được đưa ra bởi Tsoularis và Wallace (2002) có dạng:

$$\frac{dN}{dt} = r \cdot N^\alpha \left[1 - \left(\frac{N}{K} \right)^\beta \right]^\gamma \quad (1)$$

Trong đó: α, β, γ - các hệ số mũ; N - dân số; t - thời gian; r - tỷ lệ tăng trưởng; K - giá trị ngưỡng mà dân số đạt được (carrying capacity).

2.2. Mô hình logistic trong dự báo khai thác dầu khí

Mô hình logistic là những mô hình toán học thực nghiệm rất linh hoạt và đã được sử dụng để mô hình hóa nhiều xu hướng trong nhiều lĩnh vực thực tế. Trong lĩnh vực dầu khí, lần đầu tiên ứng dụng mô hình logistic được đưa ra bởi Hubbert (1956). Khi phân tích thống kê sản lượng khai thác than và dầu khí hàng năm của các bang tại Mỹ và của toàn thế giới, Hubbert nhận thấy rằng việc khai thác các nguồn nhiên liệu hóa thạch hữu hạn sẽ tuân theo mô hình tăng trưởng logistic, tương tự như quy luật gia tăng dân số. Ban đầu, sản lượng tăng từ từ khi các giếng đầu tiên được khoan, sau đó tăng theo cấp số nhân đạt mức tối đa và sau đó giảm xuống. Sản lượng dầu khai thác tích lũy là một hàm của thời gian:

$$Q(t) = \frac{Q_{max}}{1+a \cdot e^{bt}} \quad (2)$$

Trong đó: $Q(t)$ - sản lượng dầu khai thác tích lũy (thùng); Q_{max} - trữ lượng dầu có thể thu hồi cuối cùng (thùng); a và b - các hằng số (Sorrell và Speirs, 2014).

Sau đó, mô hình Hubbert thường được sử dụng để dự báo mức đỉnh sản lượng khai thác dầu của khu vực và thế giới (Hubbert, 1982; Juvkam-Wold, 2009; Campbell, 1997; Nashawi và nnk., 2010).

Để dự báo khai thác cho các giếng dầu khí riêng lẻ, sau khi phân tích thực nghiệm mô hình tăng trưởng logistic được đề xuất có dạng:

$$Q(t) = \frac{K \cdot t^n}{a+t^n} \quad (3)$$

Trong đó: $Q(t)$ - sản lượng khai thác dầu hoặc khí tích lũy (thùng); K - giá trị ngưỡng (thùng); a - hằng số; n - hệ số mũ; t - thời gian khai thác (ngày).

Lấy đạo hàm theo thời gian của phương trình (2) sẽ có công thức tính lưu lượng khai thác (LLKT) dầu hoặc khí:

$$q(t) = \frac{dQ}{dt} = \frac{K.n.a.t^{n-1}}{(a+t^n)^2} \quad (4)$$

Trong đó: q - lưu lượng khai thác (thùng/ngày).

Phương trình (4) là trường hợp đặc biệt của phương trình tăng trưởng logistic tổng quát (1) với $r = n \cdot \left(\frac{K}{a}\right)^{\frac{1}{n}}$; $\alpha = 1 - \frac{1}{n}$; $\beta = 1$; và $\gamma = 1 + \frac{1}{n}$ (Clark và nnk., 2011). Mô hình này khác với mô hình Hubbert ở chỗ nó được sử dụng để dự báo sản lượng cho một giếng riêng lẻ.

K - giá trị ngưỡng, là tổng lượng dầu hoặc khí có thể thu hồi từ vỉa mà không phụ thuộc vào các yếu tố thời gian hoặc kinh tế. K có ý nghĩa như là trữ lượng có thể thu hồi cuối cùng của giếng (estimated ultimate recovery - EUR) nếu không tính đến các giới hạn kinh tế. Sản lượng khai thác tích lũy (SLKTTL) cuối cùng sẽ tiệm cận K , khi lưu lượng khai thác của giếng tiến tới 0. Cần lưu ý rằng, nếu dự báo khai thác trong dài hạn thì giá trị tới hạn K ước tính theo mô hình sẽ luôn cao hơn EUR, do trong thực tế các giếng sẽ không thể khai thác đến lúc cạn kiệt mà luôn bị ràng buộc bởi yếu tố kinh tế.

Giá trị hệ số mũ n phản ánh trạng thái suy giảm lưu lượng khai thác. Giá trị hệ số mũ n càng lớn thì giếng sẽ có tốc độ suy giảm lưu lượng ổn định, ngược lại, giá trị hệ số mũ n nhỏ phản ánh tốc độ suy giảm ở lưu lượng cao trong khoảng thời gian ngắn ban đầu, sau đó ổn định ở lưu lượng khai thác nhỏ. Nếu $n > 1$, mô hình sẽ có điểm uốn, tức là lưu lượng sẽ tăng ở giai đoạn ngắn ban đầu, sau đó mới suy giảm. Ngược lại, nếu $n < 1$ thì lưu lượng của giếng đạt đỉnh ở thời điểm bắt đầu khai thác và giảm dần theo thời gian.

Khi $t^n \rightarrow a$, dễ dàng nhận thấy mô hình logistic đạt đến một nửa giá trị tới hạn:

$$\lim_{t^n \rightarrow a} \frac{K.t^n}{a+t^n} = \frac{K}{2} \quad (5)$$

Như vậy, hệ số a bằng lũy thừa bậc n của thời gian t mà tại thời điểm đó một nửa giá trị trữ lượng tới hạn sẽ được khai thác. Giá trị a càng thấp thì càng nhanh chóng khai thác được một nửa trữ lượng có thể thu hồi, lưu lượng ban đầu của giếng cao, nhưng sau đó sẽ giảm mạnh và một nửa trữ lượng có thể thu hồi còn lại sẽ được tiếp tục khai thác trong khoảng thời gian dài hơn rất nhiều. Ngược lại, nếu giá trị a cao sẽ phản ánh lưu lượng khai thác ổn định của giếng khai thác trong suốt quá trình khai thác.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Thông số đầu vào

Thông số đầu vào là dữ liệu lịch sử khai thác tầng chứa Oligocen C của 4 giếng khai thác mỏ X, bể Cửu Long.

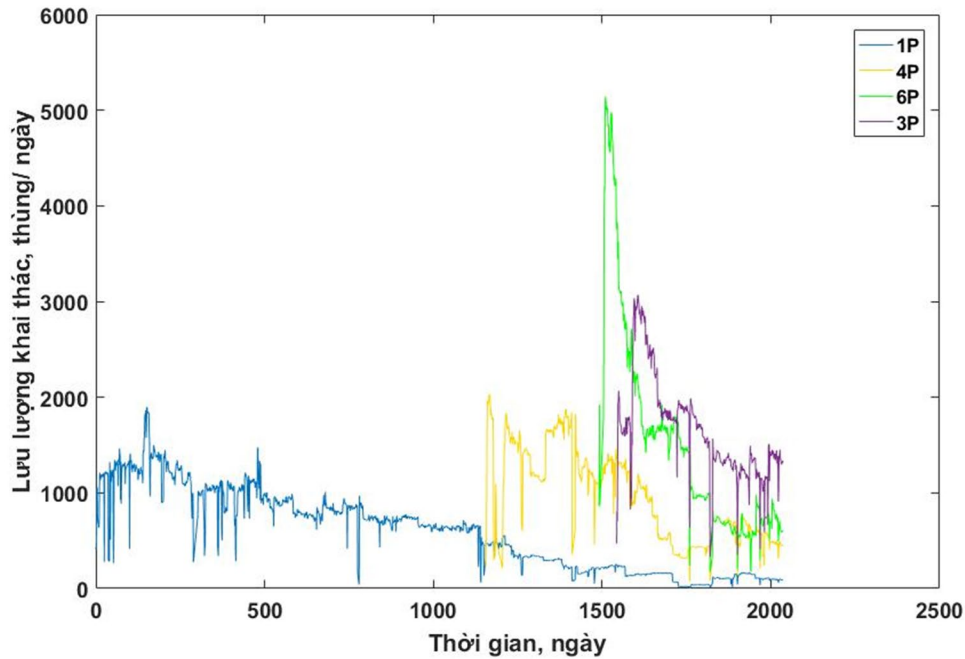
Dữ liệu khai thác của các giếng khai thác được cập nhật đến ngày 31 tháng 12 năm 2019. Giếng A được đưa vào khai thác thử dài hạn bắt đầu từ tháng 6 năm 2014, sau 67 tháng khai thác lưu lượng của giếng là 90 thùng/ngày và sản lượng dầu khai thác tích lũy là 1.192 nghìn thùng. Giếng B được đưa vào khai thác từ tháng 8 năm 2017, sau 29 tháng khai thác lưu lượng của giếng là 454 thùng/ngày và sản lượng dầu khai thác tích lũy tính là 816 nghìn thùng. Giếng C được đưa vào khai thác từ tháng 7 năm 2018, sau 18 tháng khai thác lưu lượng của giếng là 597 thùng/ngày, sản lượng dầu khai thác tích lũy tính là 798 nghìn thùng. Giếng D được đưa vào khai thác từ tháng 8 năm 2018, sau 16 tháng khai thác lưu lượng của giếng vẫn rất cao, đạt 1.319 thùng/ngày, sản lượng dầu khai thác tích lũy là 811 nghìn thùng. Hình 1 chỉ ra rằng, hiện tại lưu lượng khai thác của giếng khai thác D chiếm ưu thế khi khai thác trong tầng chứa Oligocen C. Lưu lượng của giếng A hiện đã khá thấp, chỉ đạt 90 thùng/ngày nên giếng sẽ sớm bị đóng vì hiệu quả kinh tế thấp.

3.2. Xây dựng mô hình tăng trưởng logistic

Nhóm tác giả đã xây dựng mô hình logistic cho mỗi giếng khai thác, sử dụng phương pháp hồi quy phi tuyến (nonlinear regression) bằng cách ứng dụng hàm nlinfit trong Matlab.

Các biến dữ liệu có thể được nhập vào từ file excel, và được biểu diễn dưới dạng ma trận có kích thước $m \times n$ (m hàng và n cột).

Hàm nlinfit được tích hợp trong Matlab với cấu trúc: $\text{beta} = \text{nlinfit}(X, Y, \text{modelfun}, \text{beta0})$ cho phép ước tính các hệ số cho hồi quy phi tuyến của các phản hồi trong Y (là sản lượng khai thác tích lũy của giếng khai thác) trên biến số X (là thời gian khai thác) bằng cách sử dụng mô hình được chỉ định bởi modelfun (công thức 3) với beta0 là vector chứa các giá trị ban đầu bất kỳ của K , n , a được người dùng chỉ định. Giá trị trả về của hàm nlinfit là vector beta là bộ ba hệ số " K , n , a " được xác định bằng cách sử dụng ước lượng bình phương nhỏ nhất.



Hình 1. Lưu lượng khai thác dầu của các giếng khai thác tầng Oligocen C.

Các thông số của mô hình được xác định dựa trên thuật toán tối ưu, do vậy mô hình tăng trưởng logistic có tính thực tế cao hơn so với mô hình Arps truyền thống (Trần và nnk., 2019).

Kết quả xác định các thông số của mô hình logistic của các giếng khai thác ứng dụng hàm nlinfit trong Matlab được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Kết quả xác định các thông số của mô hình logistic.

	K, nghìn thùng	n	a, ngày
Giếng A	1539	1,346	6948
Giếng B	1135	1,313	2830
Giếng C	1238	0,921	181
Giếng D	1585	1,154	1237

Bảng 2. Tính toán thời gian khai thác một nửa trữ lượng có thể thu hồi của các giếng khai thác.

	n	a, ngày	Thời gian đã khai thác, ngày	$t_{K/2}$, ngày
Giếng A	1,346	6948	2036	715
Giếng B	1,313	2830	882	426
Giếng C	0,921	181	545	283
Giếng D	1,154	1237	493	478

Giếng A và D có giá trị K rất gần nhau nhưng hệ số n của giếng D thấp hơn và giá trị a của giếng D thấp hơn rất nhiều. Tức là mô hình nhận diện giếng D khai thác ở giai đoạn đầu với lưu lượng cao, sau đó lưu lượng suy giảm mạnh, còn giếng A khai thác với lưu lượng suy giảm ổn định hơn. Hệ số n của 3 giếng khai thác A, B, D đều lớn hơn 1, tức là các giếng này có lưu lượng tăng trong khoảng thời gian ngắn ban đầu, sau đó mới suy giảm, còn giếng C có giá trị n thấp hơn 1, tức là mô hình nhận diện giếng khai thác này có lưu lượng ban đầu là đỉnh và dần suy giảm trong quá trình khai thác. Từ kết quả tính toán tại Bảng 2 cho thấy giếng D vừa đạt đến mốc khai thác được một nửa trữ lượng có thể thu hồi cuối cùng $t_{K/2}$ (khi $t^n \rightarrow a$), các giếng còn lại thì đã qua mốc này từ lâu. Giếng C có giá trị a và n đều thấp, do đó có sự suy giảm lưu lượng nhanh nhất và chỉ sau hơn 9 tháng từ khi bắt đầu khai thác với lưu lượng cao ở giai đoạn đầu đã thu hồi được một nửa trữ lượng tới hạn của giếng.

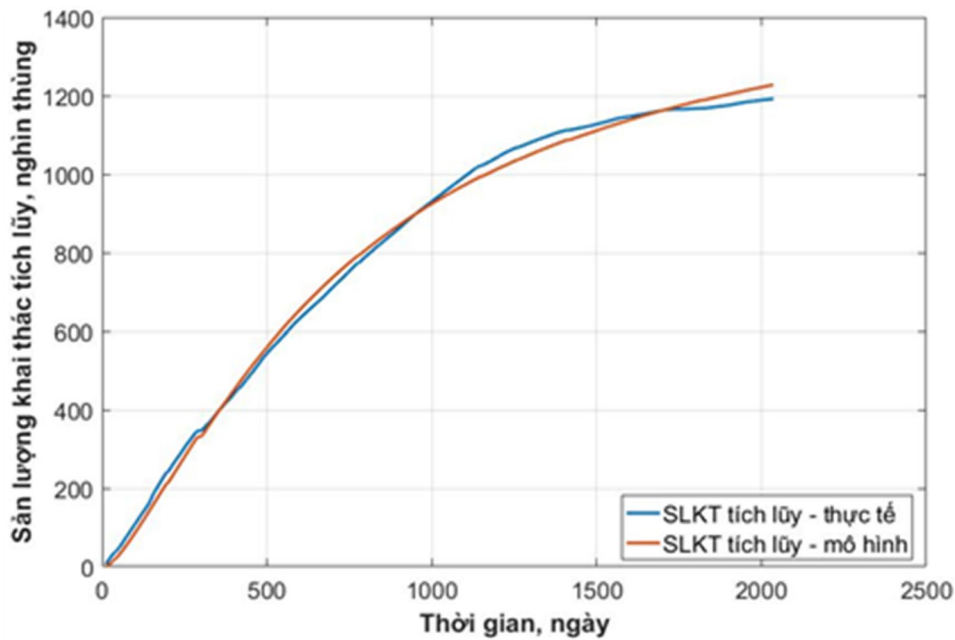
Qua đánh giá các hệ số thu được cho thấy, mô hình logistic phản ánh rất đúng sự suy giảm lưu lượng thực tế trong các giếng khai thác.

3.3. Phân tích độ tin cậy của mô hình tăng trưởng logistic và dự báo khai thác dầu khí

Từ Hình 2 cho thấy, sản lượng khai thác tích lũy rất khớp với mô hình logistic. Quá trình khớp lịch sử khai thác của các giếng khai thác được thể hiện trên các Hình 3÷6. Mô hình logistic có thể phản ánh tốt xu hướng số liệu khai thác của các giếng khai thác.

Tổng sản lượng khai thác cộng dồn của tầng chứa Oligoxen C ước tính bởi mô hình logistic đã xây dựng theo công thức 3 và các thông số ở Bảng 1 rất sát với dữ liệu thực tế (Bảng 3), sai số tuyệt đối là 67 nghìn thùng, sai số tương đối trung bình các giếng khai thác là 16,8 nghìn thùng, sai số tương đối là 1,85% và sai số tương đối trung bình các giếng là 1,72%. Có thể nhận thấy, có giếng khai thác mô hình ước tính cao hơn so với giá trị thực tế, cũng có giếng thì ngược lại, mô hình ước tính

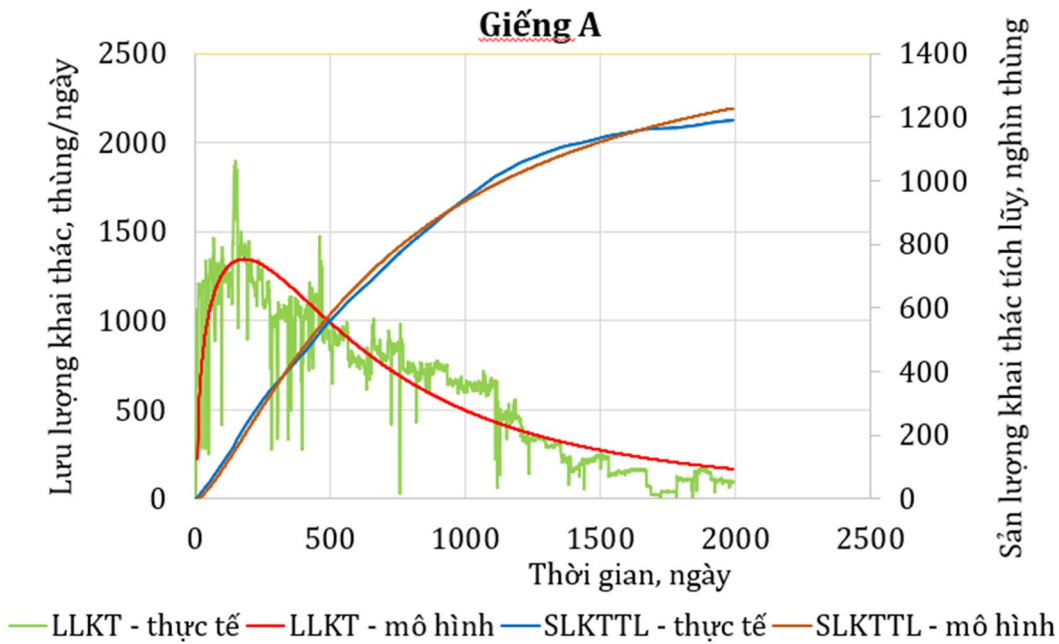
thấp hơn so với giá trị thực tế. Do vậy, để tránh các sai số tiềm ẩn bị che dấu khi các giá trị âm và dương này triệt tiêu nhau khi tính toán sai số tuyệt đối của mỗi giếng khai thác nhóm tác giả đã lấy giá trị tuyệt đối. Kết quả so sánh chứng tỏ mô hình logistic dùng để tính toán cho độ chính xác cao. Vì vậy, nhóm tác giả sử dụng các mô hình logistic đã xây dựng theo công thức 3 và các thông số ở Bảng 1 để dự báo sản lượng khai thác cho các giếng khai thác cho đến thời điểm kết thúc hợp đồng đầu khí đã được phê duyệt (hết ngày 31 tháng 03 năm 2025), ngoại trừ giếng A do lưu lượng khai thác đã thấp dưới 100 thùng/ngày. Dự báo cũng có thể kết thúc sớm hơn nếu lưu lượng của giếng giảm tới 100 thùng/ngày (các Hình 3÷6).



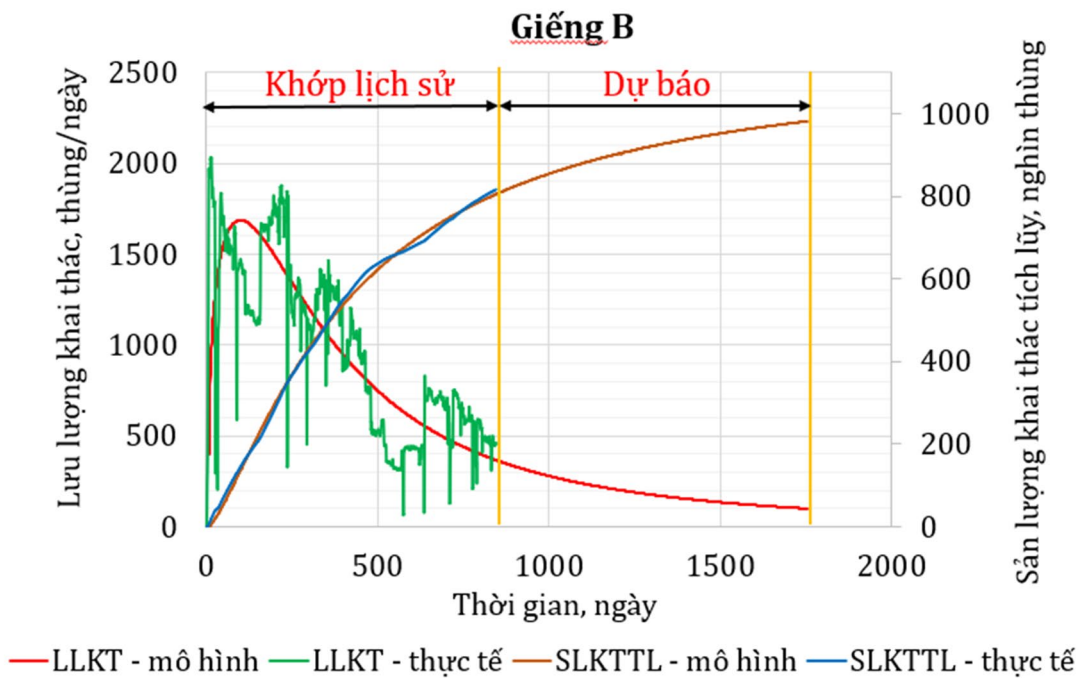
Hình 2. Kết quả khớp lịch sử sản lượng khai thác tích lũy giếng A với mô hình tăng trưởng logistic đã xây dựng.

Bảng 3. So sánh sản lượng khai thác tích lũy ước tính theo mô hình logistic (LGM) và dữ liệu thực tế.

	Thực tế, nghìn thùng	LGM, nghìn thùng	Sai số tuyệt đối, nghìn thùng	Sai số tương đối, %
Giếng A	1192,060	1227,913	35,853	3,01
Giếng B	815,896	804,861	11,035	1,35
Giếng C	797,681	791,984	5,697	0,71
Giếng D	811,206	796,707	14,499	1,79
Tầng Oligoxen C	3616,843	3621,465	67,084	1,85



Hình 3. Kết quả khớp lịch sử khai thác giếng A với mô hình logistic.
(LLKT - lưu lượng khai thác, SLKTTL - sản lượng khai thác tích lũy tính)

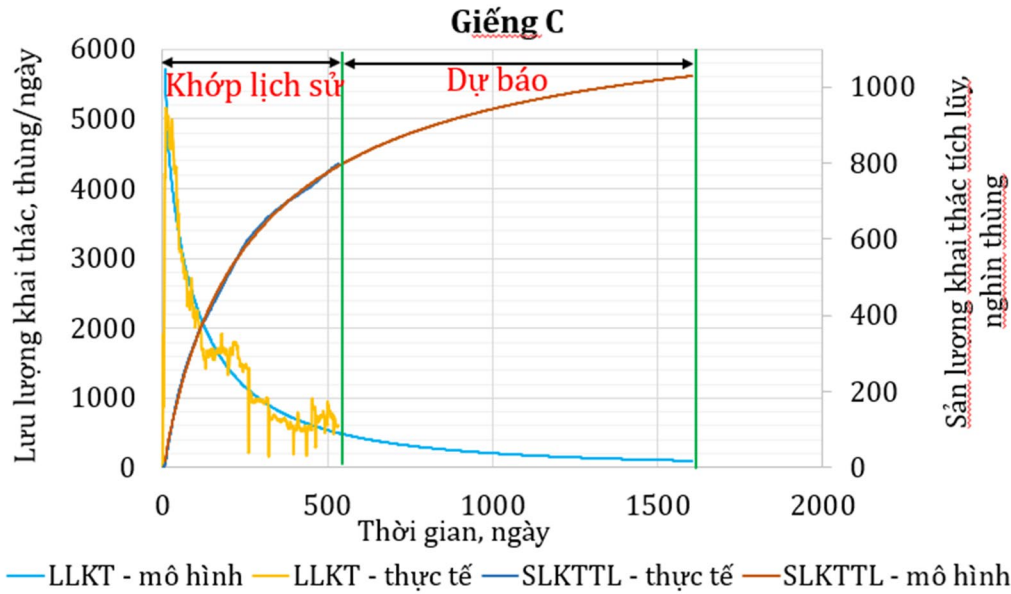


Hình 4. Kết quả khớp lịch sử khai thác giếng B với mô hình logistic và dự báo khai thác.

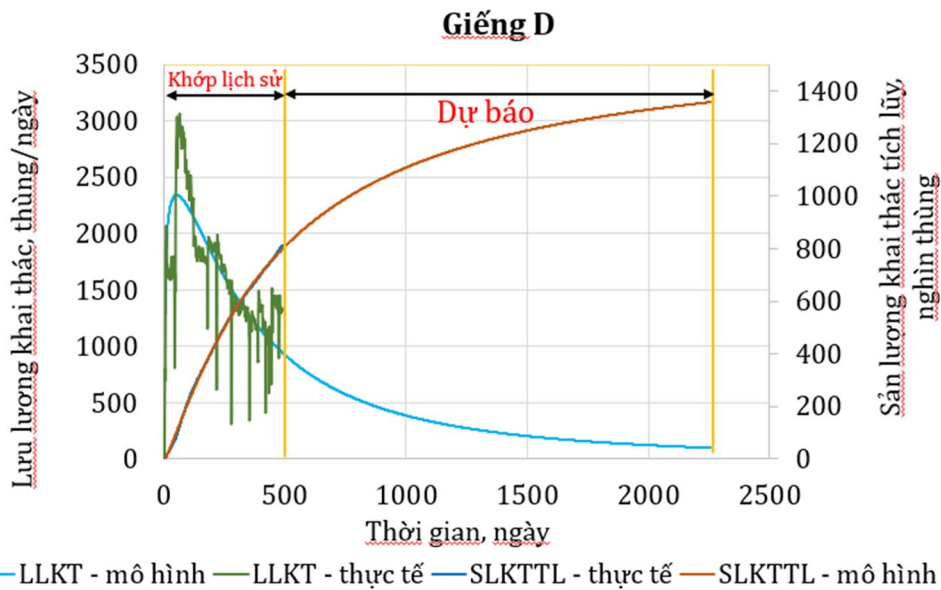
Tổng hợp kết quả dự báo khai thác cho các giếng khai thác tầng Oligoxen C bằng mô hình logistic được thể hiện trong Bảng 4. Theo đó, có thể thấy các giếng đều có lưu lượng suy giảm tới 100 thùng/ngày trước thời hạn của hợp đồng dầu khí nếu không có các biện pháp tác động để tăng lưu lượng khai thác. Giếng B và C giảm tới giá trị

lưu lượng tối hạn (cut-off) trong năm 2022, chỉ có giếng D duy trì khai thác được đến cuối năm 2024.

Giếng D vừa đạt đến mốc khai thác được một nửa trữ lượng có thể thu hồi cuối cùng $t_{K/2}$ (khi $t^n \rightarrow a$) sau gần 16 tháng và một nửa trữ lượng còn lại sẽ được khai thác trong suốt 58 tháng tiếp theo.



Hình 5. Kết quả khớp lịch sử khai thác giếng C với mô hình logistic và dự báo khai thác.



Hình 6. Kết quả khớp lịch sử khai thác giếng D với mô hình logistic và dự báo khai thác.

4. Kết luận

Nhóm nghiên cứu đã thực hiện dự báo lưu lượng khai thác tầng chứa Oligoxen C cho các giếng khai thác của một mỏ thuộc bể Cửu Long bằng mô hình logistic đã xây dựng có độ tin cậy cao với sai số tương đối là 1,85%. Các giếng đều có lưu lượng suy giảm tới 100 thùng/ngày trước thời hạn của Hợp đồng dầu khí nếu không có các biện pháp tác động để tăng lưu lượng khai thác. Trong tương lai, có thể hiệu chỉnh mô hình dự báo được

đề xuất trên bằng việc tiếp tục cập nhật các số liệu khai thác thực tế và kiểm tra độ tin cậy của mô hình. Phương pháp dự báo khai thác sử dụng mô hình logistic có thể được áp dụng giảng dạy cho sinh viên và cho các cán bộ kỹ thuật trong thực tế tính toán.

Đóng góp của các tác giả

Bùi Thị Ngân - phân tích, xây dựng mô hình logistic, đánh giá kết quả; Nguyễn Duy Mười - thực hiện tổng hợp và xử lý số liệu đầu vào; Trần Thị

Oanh - tính toán, đánh giá các thông số thu được của giếng khai thác; Nguyễn Minh Hòa - đánh giá độ tin cậy của mô hình; Lê Ngọc Ánh - dự báo khai thác.

Tài liệu tham khảo

- Arps, J. J. (1945) Analysis of Decline Curves. *Transactions of the AIME*, 160(1), 228-247.
- Campbell, C. J. (1997). *The coming oil crisis*. Brentwood, Essex, UK: Multi-Science Publishing and Dublin, Republic of Ireland: Petroconsultants.
- Campbell, C. J., & Heapes, S. (2008). *An atlas of oil and gas depletion*. Huddersfield, UK: Jeremy Mills Publishing.
- Clark, A. J., Lake, L. W., & Patzek, T. W. (2011). Production forecasting with Logistic Growth Models. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Denver, Colorado, USA, 30 October - 2 November.
- Juvkam-Wold, H. C., & Dessler, A. J. (2009). Using the Hubbert equation to estimate oil reserves. *World Oil*, 230, 4.
- Hubbert, M. K. (1956). Nuclear energy and the fossil fuels. In *Meeting of the Southern District, Division of Production, American Petroleum Institute*, San Antonio, TX, USA, 7-9 March 1956. San Antonio, TX: Shell Development Company.
- Hubbert, M. K. (1982). Techniques of prediction as applied to the production of oil and gas. In *Proc. Symp. on Oil and Gas Supply Modeling, Washington, DC, USA, 18-20 June 1980*. NBS Spec. Publ. no. 631, pp. 16-141. Washington, DC: US Department of Commerce.
- Laherrefre, J. (2000). Learn strengths, weaknesses to understand Hubbert curve. *Oil Gas Journal*, 98(16), 63-76.
- Laherrefre, J. (2002). Modelling future liquids production from extrapolation of the past and from ultimates. *Energy exploration & exploitation*, 20(6), 457-479.
- Laherrefre, J. (2004). *Oil and natural gas resource assessment: production growth cycle models*. In *Encyclopaedia of energy* (ed. CJ Cleveland). Elsevier. Amsterdam, pp. 617-631.
- Mohr, S., & Evans, G. (2008). Peak oil: testing Hubbert's curve via theoretical modeling. *Natural Resources Research*, 17(1), 1-11.
- Nashawi, I. S., Malallah, A., & Al-Bisharah, M. (2010). Forecasting world crude oil production using multi-cyclic Hubbert model. *Energy Fuels*, 24, 1788-1800.
- Nguyễn, V. H., & Lê, P. N. (2019). Phát triển mô hình dự báo khai thác cho các giếng dầu khí. *Tạp chí dầu khí*, 8, 14-20.
- Sorrell, S., & Speirs, J. (2014). Using growth curves to forecast regional resource recovery: approaches, analytics and consistency tests. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 372(2006), 20120317.
- Tsoularis, A., & Wallace, J. (2002). Analysis of logistic growth models. *Mathematical Biosciences*, 179(1), 21-55.
- Trần, Đ. T., Đinh, Đ. H., Trần, X. Q., Phạm, T. G., Lê, V. Q., Lê, T. H., Lê, Q. T., & Trần, N. L., (2019). Nghiên cứu ứng dụng mô hình tăng trưởng logistic để dự báo khai thác cho tầng Miocene dưới, mỏ Bạch Hổ. *Tạp chí dầu khí*, 9, 16-22.
- Verhulst, P. F. (1838), Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement, *Correspondance mathématique et physique* 10, pp. 113-121.