

# ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP WILSON - $\theta$ TRONG FEM PHÂN TÍCH TÁC ĐỘNG CỦA ĐỘNG ĐẤT TỚI ĐẬP BÊ TÔNG TRỌNG LỰC

Nguyễn Quang Hùng<sup>1</sup>

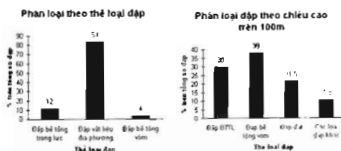
## TÓM TẮT

Tác động của động đất tới công trình xây dựng nói chung và công trình thủy lợi, thủy điện nói riêng là hết sức to lớn. Việc tính toán thiết kế công trình chịu tác động của tải trọng động đối với công trình thủy lợi, thủy điện Việt Nam đang còn nhiều hạn chế. Nội dung bài báo này giới thiệu một cách ứng dụng phương pháp Wilson- $\theta$  xây dựng thuật toán giải bằng phương pháp phần tử hữu hạn trong phần mềm mã nguồn mở nhằm nghiên cứu tác động của động đất tới đập bê tông trọng lực là một trong những loại hình công trình đáng nước phổ biến của ngành thủy lợi, thủy điện. Các kết quả nghiên cứu góp phần hoàn thiện công nghệ tính toán đập bê tông trọng lực dưới tác dụng của dao động.

**Từ khóa:** Đập bê tông trọng lực, phương pháp phần tử hữu hạn, tích phân thời gian, Wilson- $\theta$ .

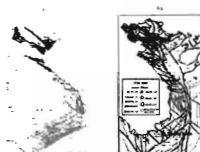
## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Việt Nam là một quốc gia có tài nguyên nước phong phú, số lượng hồ đập nhiều trong đó có hơn 500 hồ đập lớn được xếp hạng thứ 16 trên thế giới. Các loại hình đập dâng nước phong phú đa dạng với các hình thức: đập đất đông chất, đập vật liệu địa phương, đá bê tông trọng lực, bê tông đầm lăn... Trên thế giới, đối với những đập cao và nhất là cao trên 100 m trở lên thì loại hình đập đầm bằng vật liệu bê tông chiếm đa số và Việt Nam cũng không nằm trong ngoại lệ (Hình 1) nhất là từ những năm 2000 trở lại đây, các đập thủy điện với cột nước cao được xây dựng tương đối phổ biến [1].



Hình 1. Phân loại đập trên thế giới

Không những thế, Việt Nam là một quốc gia nằm trong khu vực vành đai động đất Thái Bình Dương, là một trong những quốc gia mà khi tính toán công trình cần xét đến tác động của tải trọng động nhất là trong điều kiện biến đổi khí hậu hiện nay khi mà thiên tai biến đổi bất thường [1, 3, 4].



Hình 2. Bản đồ phân vùng động đất ở Việt Nam

Các nghiên cứu phân tích tác động của động đất tới đập bê tông ở Việt Nam còn chưa nhiều, chủ yếu tập trung vào xác định các thông số của động đất trong vùng xây dựng công trình [3, 4, 5]. Các bài toán tính toán tác động của động đất chủ yếu tập trung cho công trình xây dựng nói chung, với độ mảnh công trình lớn và chủ yếu xử dụng phương pháp tuyến tính [5, 9]. Các quy định chung cũng như phương pháp tính toán đối với tác động của động đất tới loại hình công trình đập dâng nước với chiều cao lớn cũng chưa được quy định một cách cụ thể [6, 8]. Để có một cách nhìn tổng quát hơn cũng như hoàn thiện hơn nữa về nghiên cứu tác động của tải trọng động, đã ứng dụng phương pháp phi tuyến nhằm đưa ra các bước giải trong phương pháp FEM giải bài toán phi tuyến về tải trọng động áp dụng cho công trình thủy lợi, thủy điện là những loại hình công trình có độ mảnh nhỏ [10].

## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Phương trình cơ bản

Rời rạc hóa miền không gian tính toán, sau khi miền không gian rời rạc, dạng tổng quát của phương

<sup>1</sup> Trường Đại học Thủy lợi

trình động lực có thể được biểu diễn dưới dạng phương trình vi phân bậc hai sau đây:

Khi phân tích tính toán tác dụng của tải trọng động bởi công trình, ngoài việc xem xét đến tác dụng của trường trọng lực, áp lực nước cũng như các tác dụng khác của tải trọng ngoài, cần phải xem xét đến tác dụng do lực quán tính động cũng như lực cản gây ra. Gọi  $\{v_g^*(t)\} = \{u_g^*(t), w_g^*(t)\}$  là véc tơ gia tốc chuyển vị ngang và đứng của động đất,  $\{u(t), w(t)\}$  là véc tơ chuyển vị phản ứng của chất điểm,  $\{u'(t), w'(t)\}, \{u''(t), w''(t)\}$  lần lượt là véc tơ vận tốc và gia tốc phản ứng của chất điểm. Khi đó  $\{\delta(t)\}, \{\delta'(t)\}, \{\delta''(t)\}$  lần lượt là véc tơ chuyển vị, vận tốc và gia tốc của chất điểm. Phương trình cân bằng động lực có thể được thể hiện dưới dạng phương trình vi phân bậc 2 sau đây:

$$[M] \{\delta''(t)\} + [C] \{\delta'(t)\} + [K] \{\delta(t)\} = -[M] [G] \{v_g^*(t)\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

Trong đó:

[M] - Ma trận khối lượng ;

[C] - Ma trận cản ;

[K] - Ma trận cứng tổng thể ;

[F(t)] Lực động đất.

Ma trận khối lượng [M] được xây dựng trên cơ sở các ma trận khối lượng phần tử  $[m]^e$  và ma trận độ cứng phần tử  $[k]^e$  như sau:

$$[k]^e = \iiint_{\Omega} [B]^T [D] [B] d\Omega \quad (2a)$$

$$[m]^e = \iiint_{\Omega} [N]^T \rho [N] d\Omega \quad (2b)$$

Thông thường ma trận cản [C] tổng thể được tuyến tính hóa dựa trên ma trận khối lượng tổng thể [M] và ma trận cứng tổng thể [K] được gọi là ma trận cản Rayleigh:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (3)$$

Trong đó:  $\alpha, \beta$  lần lượt là các hệ số và các hệ số này phụ thuộc vào các tài liệu quan trắc thực tế.

Khi giải phương trình cơ bản (1) có thể sử dụng phương pháp phổ phản ứng hoặc phương pháp tích phân thời gian. Đối với phương pháp phổ phản ứng: Lần lượt giải phản ứng tại từng pha dao động điển hình để từ đó có thể tổng hợp lại thành tổng dao động cuối cùng của kết cấu. Phương pháp này tính

toán đơn giản và dựa trên nguyên lý chồng (cộng) dao động. Loại hình phương pháp này phù hợp với các bài toán dao động đàn hồi và được gọi là phương pháp phổ phản ứng.

Đối với phương pháp tích phân thời gian (lịch sử thời gian) hay còn gọi là phương pháp tích phân trực tiếp: dựa vào phương trình cơ bản (1) tiến hành tích phân, giải ra được quá trình phản ứng của kết cấu theo thời gian thực chịu tác dụng tải trọng động. Phương pháp giải này phù hợp với các bài toán tuyến tính, phi tuyến, tự thích ứng nhưng khối lượng tính toán so với phương pháp phổ phản ứng lớn hơn rất nhiều [6]. Phương pháp tích phân Newmark và Wilson- $\theta$  được ứng dụng tương đối rộng rãi, hai phương pháp này đều là phương pháp tuyến tính về gia tốc. Nhóm hai phương pháp đều giả thiết trong khoảng thời gian  $[t, t+\Delta t]$  gia tốc thay đổi theo quy luật tuyến tính. Chính giả thiết này dẫn đến sự ổn định của quá trình giải phương trình (1).

## 2.2. Phương pháp giải

Khi sử dụng phương pháp Wilson- $\theta$  để giải phương trình (1), không chế tham số tích phân  $\theta \geq 1$ , giả thiết gia tốc thay đổi trong khoảng  $[t, t+\Delta t]$  thay đổi tuyến tính. Tuy nhiên nhiều kết quả nghiên cứu đã chứng minh được rằng  $\theta \geq 1,37$  thì phương trình (1) luôn luôn hội tụ, thường chọn  $\theta=1,4$  [9-11]. Đối với bài toán tuyến tính gia tốc, giả thiết gia tốc thay đổi trong khoảng  $[t, t+\theta(\Delta t)]$  thay đổi tuyến tính với  $\theta < 1$ . Khi đó gia tốc tại bước thời gian  $t+\tau$  ( $0 \leq \tau \leq \theta\Delta t$ ) có thể xác định được theo công thức:

$$\{\delta\}_{t+\tau} = \{\delta\}_t + \frac{\tau}{\theta\Delta t} (\{\delta\}_{t+\theta\Delta t} - \{\delta\}_t) \quad (4)$$

$$0 \leq \tau \leq \theta\Delta t$$

Tiến hành tích phân phương trình (3), khi  $\tau=\theta\Delta t$  có thể thu được véc tơ vận tốc  $\{\dot{\delta}\}$  và véc tơ chuyển vị  $\{\delta\}$  như sau:

$$\begin{cases} \{\delta\}_{t+\theta\Delta t} = \{\delta\}_t + \frac{\theta\Delta t}{2} (\{\dot{\delta}\}_{t+\theta\Delta t} + \{\dot{\delta}\}_t) \\ \{\dot{\delta}\}_{t+\theta\Delta t} = \{\dot{\delta}\}_t + \theta\Delta t \{\delta\}_t + \frac{(\theta\Delta t)^2}{6} (\{\ddot{\delta}\}_{t+\theta\Delta t} + 2\{\ddot{\delta}\}_t) \end{cases} \quad (5)$$

Khi đó vector vận tốc  $\{\dot{\delta}\}$  và véc tơ chuyển vị  $\{\delta\}$  tại thời điểm  $t+\theta\Delta t$  được xác định theo công thức:

$$\begin{cases} \{\dot{\delta}\}_{t+\theta\Delta t} = \frac{(\theta\Delta t)^2}{6} (\{\ddot{\delta}\}_{t+\theta\Delta t} - \{\ddot{\delta}\}_t) - \frac{6}{\theta\Delta t} \{\delta\}_t - 2\{\dot{\delta}\}_t \\ \{\delta\}_{t+\theta\Delta t} = \frac{3}{\theta\Delta t} (\{\ddot{\delta}\}_{t+\theta\Delta t} - \{\ddot{\delta}\}_t) - 2\{\dot{\delta}\}_t - \frac{\theta\Delta t}{2} \{\delta\}_t \end{cases} \quad (6)$$

Thay thế công thức (6) vào công thức (1) có thể tìm ra được véc tơ chuyển vị  $\{\delta\}_{t+\Delta t}$  tại thời điểm  $t + \theta \Delta t$ . Dựa vào các véc tơ chuyển vị  $\{\delta\}_t$ , vận tốc  $\{\dot{\delta}\}_t$ , gia tốc  $\{\ddot{\delta}\}_t$  tại thời điểm  $t$  đã biết, có thể tìm ra được vận tốc  $\{\dot{\delta}\}_{t+\Delta t}$ , gia tốc  $\{\ddot{\delta}\}_{t+\Delta t}$  tại thời điểm  $t+\theta \Delta t$ .

Các nội dung tóm tắt ở trên được thể hiện thành các bước giải cụ thể như sau:

**Bước 1:** Dựa vào phương pháp phần tử hữu hạn, xây dựng ma trận cứng tổng thể  $[K]$ , ma trận cản  $[C]$  và ma trận khối lượng  $[M]$ .

**Bước 2:** Giải bài toán tĩnh để xác định trạng thái ban đầu cho bài toán động. Từ đó xác định được các giá trị ban đầu  $\{\delta\}_0$ , vận tốc  $\{\dot{\delta}\}_0$ , thông qua giải phương trình động xác định được gia tốc  $\{\ddot{\delta}\}_0$ .

**Bước 3:** Lựa chọn  $\theta = 1,4$ , tính toán các tham số tích phân sau:

$$\begin{cases} a_0 = \frac{6}{(\theta \Delta t)^2} \\ a_1 = \frac{3}{\theta \Delta t} \\ a_2 = 2a_1 \\ a_3 = \frac{\theta \Delta t}{2} \\ a_4 = \frac{a_2}{\theta} \end{cases} \quad \begin{cases} a_5 = -\frac{a_1}{\theta} \\ a_6 = 1 - \frac{3}{\theta} \\ a_7 = \frac{\Delta t}{2} \\ a_8 = \frac{\Delta t^2}{6} \end{cases} \quad (7)$$

**Bước 4:** Dựa vào các tham số đã tính toán được ở bước 3, tiến hành tính toán ma trận cứng tổng thể mới:

$$[\bar{K}] = [K] + a_0[M] + a_1[C] \quad (8)$$

**Bước 5:** Tính toán véc tơ tải gia tăng tại bước thời gian  $t + \theta \Delta t$ :

$$\begin{aligned} \{\bar{F}\}_{t+\Delta t} = & \{F\}_t + [M]\{a_0\{\delta\}_t + a_2\{\dot{\delta}\}_t + 2\{\ddot{\delta}\}_t\} \\ & + [C]\{a_1\{\delta\}_t + 2\{\dot{\delta}\}_t + a_3\{\ddot{\delta}\}_t\} \end{aligned} \quad (9)$$

**Bước 6:** Tính toán thành phần chuyển vị tại thời điểm  $t + \theta \Delta t$ :

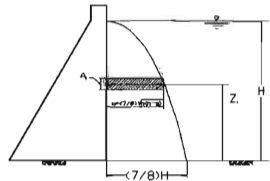
$$\{\delta\}_{t+\Delta t} = [\bar{K}]^{-1} \{\bar{F}\}_{t+\Delta t} \quad (10)$$

**Bước 7:** Tính toán các thành phần gia tốc, vận tốc và chuyển vị tại thời điểm  $t + \Delta t$ :

$$\begin{cases} \{\delta\}_{t+\Delta t} = a_4(\{\delta\}_{t+\Delta t} - \{\delta\}_t) + a_5\{\dot{\delta}\}_t + a_6\{\ddot{\delta}\}_t \\ \{\dot{\delta}\}_{t+\Delta t} = \{\dot{\delta}\}_t + a_7(\{\delta\}_{t+\Delta t} - \{\delta\}_t) \\ \{\ddot{\delta}\}_{t+\Delta t} = \{\ddot{\delta}\}_t + \Delta t\{\dot{\delta}\}_{t+\Delta t} + a_8(\{\ddot{\delta}\}_{t+\Delta t} + 2\{\ddot{\delta}\}_t) \end{cases} \quad (11)$$

### 2.3. Điều kiện tải trọng ban đầu

Khi đập bê tông làm việc trong điều kiện bình thường (trường hợp vận hành), đập chịu tác dụng của các lực như trọng lượng bản thân, áp lực thấm dưới đáy đập, áp lực nước thủy tĩnh tại biên thượng và hạ lưu đập. Tuy nhiên dưới tác dụng của tải trọng động, nước trong hồ dao động và gây ra áp lực tăng thêm tác dụng tới đập. Trong các nghiên cứu cơ bản theo tiêu chuẩn Việt Nam, hiện nay thông thường xác định áp lực này bằng một hệ số tăng thêm và được xác định theo chiều nguy hiểm nhất [7]. Tuy nhiên về bản chất áp lực động và đập có những sự tương hỗ lẫn nhau, trong phạm vi nghiên cứu này, đã sử dụng lý thuyết của Westergaard [12] coi áp lực thủy động tác dụng lên mặt thượng lưu đập do động đất gây ra tương đương với các lực quán tính của một lượng nước tác dụng lên đập. Vùng nước này theo Westergaard giới hạn bởi phương trình parabol như hình 3 và cùng phương ngược chiều với gia tốc động đất.



Hình 3. Áp lực nước tác dụng lên mặt đập

Khi đó áp lực nước tăng thêm của mỗi nút phần tử được xác định theo công thức:

$$M_{zn} = \frac{7}{8} \gamma_n \sqrt{H(H - z_n)} A_i \quad (12)$$

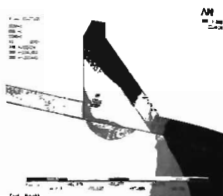
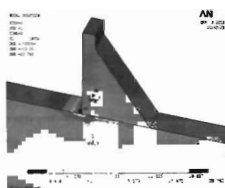
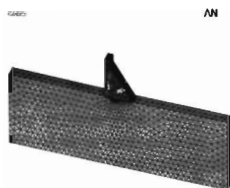
Trong đó:

- H: Chiều cao cột nước trước đập (m) ;
- Zi: Khoảng cách từ đáy đập tới nút đang xét (m);
- Ai: Phần vùng diện tích ảnh hưởng của nút (m<sup>2</sup>);
- $\gamma_n$ : Trọng lượng riêng của nước (N/m<sup>3</sup>)

### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

#### 3.1. Số liệu đầu vào

Ví dụ dùng để nghiên cứu ở đây là một đập bê tông trọng lực được xây dựng trên nền đá vôi các chỉ tiêu cơ lý như sau:



Hình 4. Lưới phần tử tính toán

Hình 5. Trạng thái ứng suất tĩnh  $S_1$

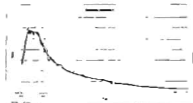
Hình 6. Trạng thái ứng suất tĩnh  $S_3$

Bảng 1. Đặc trưng vật liệu làm đập và nền

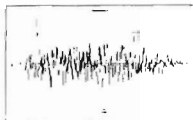
Thông số	Vật liệu	Giá trị
Khối lượng riêng ( $T/m^3$ )	Đập	0,24
	Nền	0,25
Mô đun Ex	Đập	2.10E+06
	Nền	2.10E+07
Hệ số Poisson	Đập	0,2
	Nền	0,17

Các kết quả phân tích ứng suất tĩnh được thể hiện trên hình 5 và hình 6 là trạng thái đầu vào cho bài toán phân tích động đất.

Cấp động đất được xét đến trong nghiên cứu là cấp 8 theo phổ phản ứng ngang (hình 7) và phổ gia tốc nền (hình 8) như sau [13]:

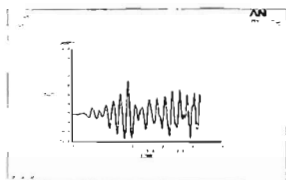


Hình 7. Phổ phản ứng theo phương ngang



Hình 8. Phổ gia tốc nền theo phương ngang

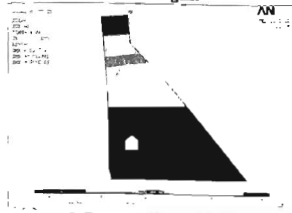
thường xuất hiện tại vùng mép biên thượng lưu đập. Kết quả chuyển vị theo phương ngang của đỉnh và đáy đập được thể hiện trên hình 9 đã cho thấy rõ quá trình dao động của đập trong quá trình xảy ra động đất.



Hình 9. Chuyển vị theo phương ngang đỉnh đập



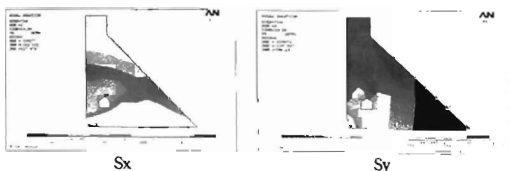
Hình 10. Kết quả ứng suất tại đáy thượng lưu đập theo thời gian



Hình 11. Kết quả chuyển vị ngang lớn nhất

### 3.2. Kết quả tính toán

Thông thường, đối với đập bê tông trọng lực trong quá trình vận hành thường làm việc theo sơ đồ nền lệch tâm về hạ lưu do tác động của áp lực thủy tĩnh trong hồ. Do vậy ứng suất chính nhỏ nhất



Hình 12. Kết quả ứng suất lớn nhất

**Bảng 2. Bảng tổng hợp kết quả tính toán**

Vi trí	Ux (m)	Uy (m)	Sx (T/m <sup>2</sup> )	Sy (T/m <sup>2</sup> )
	Time (s)	Time (s)	Time (s)	Time (s)
Đỉnh đập	0,01450	0,00573	2,71	22,11
	14,66	14,66	9,16	11,60
Đáy thượng	0,00026	0,00019	213,28	350,33
	3,8	1,86	4,06	4,06
Đáy hạ	0,0002	0,0001	147,9	78,33
	4,06	3,48	3,48	3,22

Các kết quả tính toán thể hiện trên hình 7 đến hình 10 và trong bảng 2 cho thấy rõ tình hình diễn biến chuyển vị ngang theo phương x và trạng thái ứng suất tại thời điểm đạt giá trị lớn nhất cũng như diễn biến chuyển vị ngang, ứng suất tại một số điểm đặc biệt trong đập.

**4. KẾT LUẬN**

Từ phương trình cơ bản của phương pháp FEM giải bài toán tải trọng động, đã ứng dụng phương pháp Wilson-θ để biến đổi và đưa ra các bước giải bài toán phân tích động trong phương pháp phân tử hữu hạn thuộc hệ thống các phương pháp tích phân thời gian trực tiếp. Những kết quả này là cơ sở cho các bài toán phân tích, đánh giá cũng như thiết kế công trình chịu tác dụng tải trọng động nói chung và các đập dâng, đập chắn với kích thước lớn nói riêng.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

1. Bộ Công thương, Tạp chí Công nghiệp - Vụ Năng lượng, Thủy điện Việt Nam tiềm năng và triển vọng phát triển. Nhà xuất bản Công thương, 2010.
2. Nguyễn Xuân Mãn, Nguyễn Duyên Phong, Nguyễn Xuân Tùng (2011). Động đất và vấn đề đặt ra trong xây dựng ở Việt Nam. Tuyển tập các công trình khoa học Đại học Mỏ địa chất, 6- 2011, trang 71-78.
3. Phạm Văn Thực (2007). Địa chấn học và động đất tại Việt Nam. Nhà Xuất bản Khoa học Tự nhiên và Công nghệ Quốc gia. Hà Nội, 2007.
4. Nguyễn Ngọc Thủy. Bàn đồ phân vùng động

đất Việt Nam theo thang cấp động đất quốc tế MSK. Viện Vật lý địa cầu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

5. Trần Quang Minh (2017). Tính toán lựa chọn thông số động đất trong thiết kế đập bê tông đầm lăn. Các kết quả nghiên cứu khoa học và ứng dụng công nghệ, Bộ Công thương, số 3, 2017.
6. TCVN 9386-2012. Thiết kế công trình chịu động đất.
7. TCVN 9137-2012. Công trình thủy lợi - Thiết kế đập bê tông và bê tông cốt thép.
8. TCVN 335:2005. Tiêu chuẩn thiết kế đập Sơn La
9. Nguyễn Lê Minh (2007). Động đất và thiết kế công trình chịu động đất. NXB Xây dựng.
10. Nguyễn Quang Hùng (2004). Phân tích động lực trong các bài toán địa kỹ thuật. Tạp chí Thủy lợi và Môi trường, số 7 (2004), 156-162.
11. Newmark, N. M. (1959). A method of computation for structural dynamics. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 85 (EM3) 67-94.
12. Thomas J. R. Hughes (1987). The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 1987 edition.
13. Zienkiewicz O. C. & R. L. Taylor (1985). Couped Problem-A Simple Time-stepping procedure. Commum. Appl. Num. Meth.1985.1 (2):233-239.

14. Westergaard Seismic Induced Loads on Spillway Gates Phase I – Literature Review. 1933.

15. S Piero Gelfi. IMQKE software. 2005.

APPLICATION OF THE WILSON- $\theta$  METHOD IN FEM TO ANALYSIS OF CONCRETE PRESSURE ON DYNAMIC LOADING

Nguyen Quang Hung

Summary

The impact of earthquakes on construction works in general and hydropower dams in particular is very big. The calculation of the design of the project affected by dynamic loads for the hydropower project in Vietnam is still limited. The content of this paper introduces a method of applying Wilson- $\theta$  method to build a false algorithm1 by finite element method to study the impact of earthquake on gravity concrete dam as one of the types of works, offering popular water for Irrigation and Hydropower. The research results contribute to perfecting the calculation technology of gravity concrete dam under the effect of oscillation.

**Keywords:** Gravity concrete dam, Finite element method, Wilson- $\theta$  method.

**Người phân biện:** PGS.TS. Nguyễn Thống

**Ngày nhận bài:** 8/3/2019

**Ngày thông qua phân biện:** 9/4/2019

**Ngày duyệt đăng:** 16/4/2019