

PHÂN TÍCH PHI TUYẾN HÌNH HỌC KẾT CẤU DÀN VÒM TRỤ KHÔNG GIAN MỘT LỚP

GEOMETRICALLY NONLINEAR ANALYSIS OF LATTICED SHELL

TS. PHẠM VĂN ĐẠT

Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội

Tóm tắt: Bài báo trình bày kết quả phân tích phi tuyến hình học kết cấu dàn vòm trụ không gian một lớp dựa trên phương pháp nguyên lý cực trị Gauss và kết quả phân tích này được so sánh với kết quả phân tích tuyến tính để thấy được sự chênh lệch giữa hai cách phân tích. Ngoài ra, bài báo còn nghiên cứu sự ảnh hưởng độ vồng kết cấu dàn vòm không gian một lớp đến độ chênh lệch kết quả giữa phân tích tuyến tính và phân tích phi tuyến hình học.

Abstract: This paper presents the results of geometrically nonlinear analysis of latticed shell which based on Gaussian principle and this results will be compared with the result of linear analysis in order to see the difference between these two methods. In addition, the paper also studies the effect of height-to-width ratio of latticed shell to the difference of the calculated results between linear analysis and geometrically nonlinear analysis.

Keywords: Latticed Shell, Geometrically nonlinear, Gaussian principle (Dàn vòm không gian; Phi tuyến hình học; Nguyên lý cực trị Gauss)

1. Đặt vấn đề

Trong các năm gần đây, ngày càng có nhiều công trình vượt khẩu độ lớn như: nhà thi đấu, sân vận động, nhà hát... Vì vậy kết cấu dàn là một trong những kết cấu được các nhà thiết kế lựa chọn làm giải pháp kết cấu cho các công trình này [3,5,9,15]. Các phương pháp phân tích kết cấu dàn cũng được nghiên cứu từ rất sớm và đã được trình bày trong rất nhiều tài liệu khác nhau [4,6,7,14]. Một trong những dạng kết cấu dàn được sử dụng rộng rãi hiện nay là kết cấu dàn vòm trụ không gian một lớp, vì kết cấu dàn vòm trụ không gian một lớp là hệ kết cấu nhẹ, có độ cứng tốt và thường được sử dụng làm kết cấu mái trong các công trình có kích khẩu độ nhỏ (thường $B < 25m$; $l \leq 30m$ và $B/l < 1$) [15,16] như: các xưởng sản xuất, gara sửa chữa cơ khí, các công trình phục vụ cho nông nghiệp... Kết cấu dàn vòm trụ không gian thường được liên kết với hệ

kết cấu bên dưới thông qua hệ thống dầm biên nằm trên đỉnh các cột. Tùy theo công trình cụ thể mà kết cấu dàn vòm trụ không gian một lớp có thể liên kết trên hai biên hoặc liên kết trên bốn biên với kết cấu bên dưới. Độ vồng $k = f/B$ của kết cấu dàn vòm trụ thường $(1/5 \div 1/3)$ [16]. Kết cấu dàn vòm trụ không gian một lớp có rất nhiều cách phân loại, tùy theo các tài liệu khác nhau. Nhưng nếu dựa vào hình dáng ô lưới của kết cấu dàn vòm có thể chia dàn vòm không gian một lớp ra làm bốn loại như hình 1 [16].

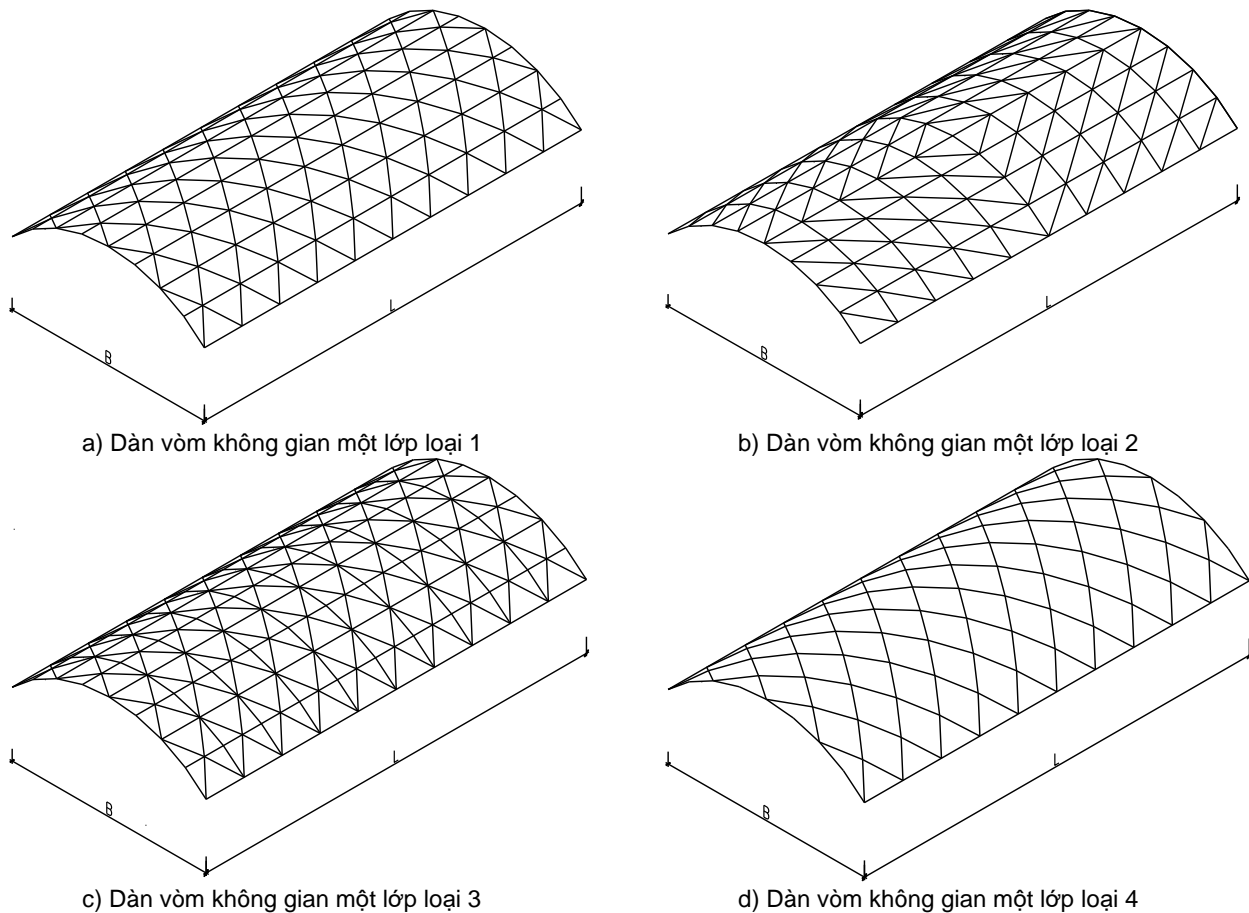
Kết cấu dàn ngày càng nhẹ, mỏng và vượt khẩu độ lớn nên vấn đề nghiên cứu xem xét ảnh hưởng của tính phi tuyến hình học cũng như phi tuyến vật liệu đến sự làm việc của kết cấu dàn đã được nhiều nhà khoa học xem xét nghiên cứu. Năm 2005 Pajand M.R. và cộng sự dựa trên phương pháp DRM (Dynamic relaxation Method) của Frankle đã xây dựng lên cách giải mới cho bài toán phân tích kết cấu dàn có kể đến chuyển vị lớn. Tuy nhiên phương pháp này còn có một số hạn chế như không cho kết quả hội tụ nếu không thêm một số điều kiện, trong quá trình lặp với tải trọng là hằng thì thường dẫn đến kết quả tải trọng tới hạn không chính xác và trong phân tích phi tuyến thường phải lặp nhiều hơn phương pháp Newton [13]. Năm 2006 Ligaro S.S. cùng cộng sự nghiên cứu phân tích kết cấu dàn tháp kể đến chuyển vị lớn, trong nghiên cứu này trên cơ sở điều kiện cân bằng của toàn hệ tác giả đã xây dựng được đường cân bằng và tải trọng tới hạn tác dụng lên kết cấu dàn tháp trong bài toán phi tuyến hình học ổn định tổng thể đàn hồi [12]. Năm 2009 Kwasniewski L. đã nghiên cứu ảnh hưởng của tỷ số chiều cao và nhịp dàn Mises đến tải trọng tới hạn tác dụng lên kết cấu trong bài toán ổn định tổng thể phi tuyến hình học của dàn Mises chịu tải trọng thẳng đứng. Trong nghiên cứu này, tác giả đã sử dụng phương pháp cân bằng nút để thiết lập được đường cân bằng cho bài toán [11]. Năm 2012 Greco M. và các cộng sự đã nghiên cứu

phân tích phi tuyến hình học của kết cấu dàn theo hai cách: cách thứ nhất là xây dựng theo vị trí nút dựa trên nguyên lý công ảo; cách thứ hai phân biến dạng của kết cấu dàn ra làm hai thành phần là biến dạng thể tích tương đối và biến dạng quay cứng xung quanh ba trục tọa độ. Trong cả hai cách của các tác giả là cuối cùng đưa về dạng các phương trình cân bằng phi tuyến, để giải các phương trình này các tác giả đã sử dụng phương pháp lặp chiều dài cung để giải [10].

Hiện nay ngoài các phương pháp được trình bày trong các tài liệu như: phương pháp tách mắt, phương pháp lực, phương pháp chuyển vị, phương pháp phần tử hữu hạn...[3,6,7,9] còn có một phương pháp tiếp cận khác để phân tích nội lực, chuyển vị của các bài toán kết cấu được nhiều tác giả đã trình bày [1, 2, 11] thông qua áp dụng nguyên lý cực trị Gauss. Để làm phong phú thêm cách giải bài toán phi tuyến hình học kết cấu dàn, trong nội dung bài báo này sẽ trình bày tính toán phi tuyến hình học của kết cấu dàn vòm trụ không gian một lớp loại 1, chịu tác dụng tải trọng thẳng đứng tại các nút dàn dựa trên phương pháp nguyên lý cực trị

Gauss, kết quả phân tích phi tuyến hình học (PTPTHH) được so sánh với kết quả khi phân tích tuyến tính (PTTT) của dàn vòm trụ không gian. Đồng thời, tác giả còn nghiên cứu ảnh hưởng độ võng của dàn vòm không gian loại 1 đến phần trăm chênh lệch (PTCL) kết quả các thành phần chuyển vị tại nút dàn, nội lực trong các thanh dàn giữa PTTT và PPTHH. Khi phân tích phi tuyến hình học kết cấu dàn, trong nội dung bài báo vẫn sử dụng một số giả thuyết sau:

- Giả thiết 1: Nút của dàn phải nằm tại giao điểm của các trục thanh và là khớp lý tưởng (các đầu thanh quy tụ ở nút có thể xoay một cách tự do không ma sát);
- Giả thiết 2: Tải trọng chỉ tác dụng tại các nút dàn;
- Giả thiết 3: Trọng lượng bản thân của các thanh không đáng kể so với tải trọng tổng thể tác dụng lên dàn;
- Giả thiết 4: Tải trọng tác dụng lên kết cấu dàn được bảo toàn về phương, chiều và độ lớn trong quá trình kết cấu biến dạng.



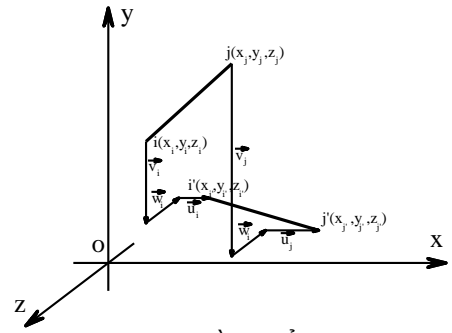
Hình 1. Một số dạng kết cấu dàn vòm không gian một lớp

2. Xây dựng lý thuyết phân tích phi tuyến hình học dàn vòm không gian một lớp theo nguyên lý cực trị Gauss

Xét thanh ij trong dàn không gian. Gọi tọa độ ban đầu của các nút lần lượt là $i(x_i, y_i, z_i)$, $j(x_j, y_j, z_j)$. Sau khi dàn chịu lực, các nút chuyển sang vị trí mới là $i'(x_i', y_i', z_i')$, $j'(x_j', y_j', z_j')$ (hình 2).

Ta có:
$$\begin{cases} x_i' = x_i + u_i & ; & y_i' = y_i + v_i & ; & z_i' = z_i + w_i \\ x_j' = x_j + u_j & ; & y_j' = y_j + v_j & ; & z_j' = z_j + w_j \end{cases} \quad (1)$$

trong đó:
$$\begin{aligned} \vec{ii}' &= u_i + v_i + w_i : \text{chuyển vị của điểm } i \\ \vec{jj}' &= u_j + v_j + w_j : \text{chuyển vị của điểm } j \end{aligned}$$



Hình 2. Sơ đồ chuyển vị của nút thanh

Chiều dài của thanh dàn trước khi biến dạng:
$$l_{ij}^{(0)} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2} \quad (2)$$

Chiều dài của các thanh dàn sau khi biến dạng:

$$l_{ij}^{(s)} = \sqrt{(x_i + u_i - x_j - u_j)^2 + (y_i + v_i - y_j - v_j)^2 + (z_i + w_i - z_j - w_j)^2} \quad (3)$$

Biến dạng dài tuyệt đối của thanh là:
$$\Delta l_{ij} = l_{ij}^{(s)} - l_{ij}^{(0)} \quad (4)$$

Như vậy nếu kết cấu dàn gồm n thanh và r nút chịu tải trọng tác dụng thì lượng ràng buộc của bài toán theo (1) được viết như sau:

$$Z = \sum_{k=1}^n \frac{E_k A_k \cdot (\Delta l_k)^2}{l_k^{(0)}} - \sum_{i=1}^r 2P_x^{(i)} \cdot u_i - \sum_{i=1}^r 2P_y^{(i)} \cdot v_i - \sum_{i=1}^r 2P_z^{(i)} \cdot w_i \rightarrow \min \quad (5)$$

$$Z = \sum_{k=1}^n \frac{E_k A_k}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}} \left(\sqrt{\frac{(x_i + u_i - x_j - u_j)^2 + (y_i + v_i - y_j - v_j)^2 + (z_i + w_i - z_j - w_j)^2}{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}} - \sum_{i=1}^r 2P_x^{(i)} \cdot u_i - \sum_{i=1}^r 2P_y^{(i)} \cdot v_i - \sum_{i=1}^r 2P_z^{(i)} \cdot w_i \right) \rightarrow \min \quad (6)$$

Xét tại nút i của dàn có m là số thanh quy tụ, điều kiện cực trị của bài toán tại nút i :

$$\frac{\partial Z}{\partial u_i} = 0; \quad \frac{\partial Z}{\partial v_i} = 0; \quad \frac{\partial Z}{\partial w_i} = 0 \quad (7)$$

Từ điều kiện (7) thiết lập được hệ phương trình sau:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^m \frac{2E_{ij} A_{ij} \cdot \Delta l_{ij}}{l_{ij}^{(0)}} \frac{(x_i + u_i - x_j - u_j)}{(l_{ij}^{(0)} + \Delta l_{ij})} - 2P_x^{(i)} = 0 \\ \sum_{j=1}^m \frac{2E_{ij} A_{ij} \cdot \Delta l_{ij}}{l_{ij}^{(0)}} \frac{(y_i + v_i - y_j - v_j)}{(l_{ij}^{(0)} + \Delta l_{ij})} - 2P_y^{(i)} = 0 \\ \sum_{j=1}^m \frac{2E_{ij} A_{ij} \cdot \Delta l_{ij}}{l_{ij}^{(0)}} \frac{(z_i + w_i - z_j - w_j)}{(l_{ij}^{(0)} + \Delta l_{ij})} - 2P_z^{(i)} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Các phương trình (8) chính là các phương trình cân bằng các nút có chuyển vị tại thời điểm kết cấu sau khi biến dạng.

Nếu bài toán có C liên kết nối đất và S_n nút dàn thì theo điều kiện (7) sẽ có được hệ phương trình bao gồm $(3S_n - C)$ phương trình phi tuyến và có $(3S_n - C)$ ẩn số là các thành phần chuyển vị u, v, w .

Giải hệ phương trình (8) sẽ tìm được các thành phần chuyển vị u, v, w tại các nút dàn.

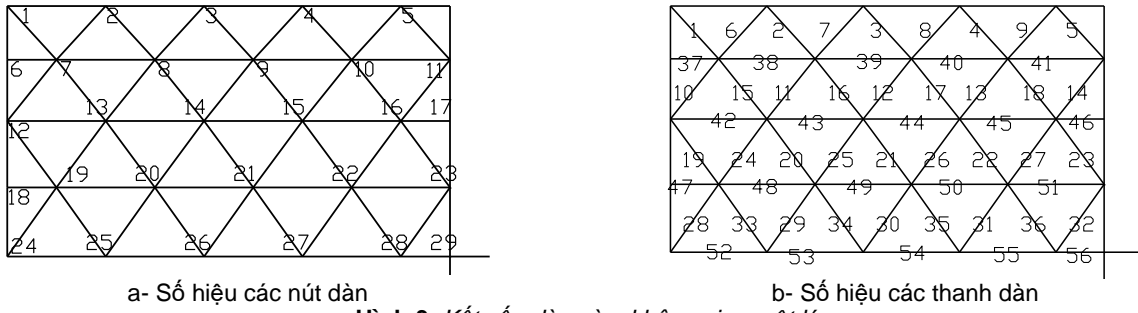
Nội lực của các thanh dàn được xác định theo

công thức:
$$N_{ij} = \frac{\Delta l_{ij} \cdot E_{ij} \cdot A_{ij}}{l_{ij}^{(0)}} \quad (9)$$

3. Ví dụ phân tích phi tuyến hình học dàn vòm không gian một lớp loại 1

Xét dàn vòm không gian một lớp loại 1 với bề rộng dàn $B=15m$, độ vồng của dàn $k=1/3$, chiều dài dàn $l=27m$ và các thanh có cùng mô đun đàn hồi $E=2.10^4(kN/cm^2)$. Tiết diện các thanh xiên là $\phi 133 \times 4mm (A=16,221cm^2)$, các thanh dọc là $\phi 89 \times 4mm (A=10,681cm^2)$ và chịu tác dụng lực $P=20(kN)$ theo phương thẳng đứng tại các nút dàn.

Do dàn đối xứng về hình học chịu tải trọng đối xứng để giảm ẩn số khi tính toán nhưng không làm ảnh hưởng đến kết quả của bài toán, tác giả phân tích tính toán cho 1/4 dàn. Trước khi viết lượng ràng buộc cho kết cấu, các nút dàn và thanh dàn được đánh số hiệu như hình 3.



Hình 3. Kết cấu dàn vòm không gian một lớp

- Thiết lập lượng ràng buộc của kết cấu

Lượng ràng buộc của kết cấu dàn vòm không gian một lớp loại 1 (6) được viết như sau:

$$Z = \sum_{k=1}^{56} \frac{E_k A_k}{I_k^{(0)}} \times (\Delta l_k)^2 + \sum_{i=7}^{10} 2P \cdot w_i + \sum_{i=13}^{16} 2P \cdot w_i + \sum_{i=19}^{22} 2P \cdot w_i + \sum_{i=25}^{28} P \cdot w_i + P \cdot (w_{11} + w_{23}) \rightarrow \min \quad (10)$$

Do tính đối xứng nên: $u_{16} - u_{17} = 0$; $w_{16} - w_{17} = 0$; $w_{28} - w_{29} = 0$ (11)

Theo phương pháp thừa số Lagrange phiếm hàm ràng buộc mở rộng L cho kết cấu có thể viết như sau:

$$L = Z + \lambda_1 (u_{16} - u_{17}) + \lambda_2 (w_{16} - w_{17}) + \lambda_3 (w_{28} - w_{29}) \rightarrow \min \quad (12)$$

trong công thức (10, 11, 12) biến dạng tuyệt đối của các thanh dàn được liên hệ với các thành phần chuyển vị tại các nút dàn đối với bài toán phi tuyến hình học là mối quan hệ phi tuyến.

- Thiết lập hệ phương trình phi tuyến từ điều kiện cực trị của phiếm hàm mở rộng

Điều kiện biên của bài toán:

$$\begin{cases} u_1 = u_2 = u_3 = u_4 = u_5 = u_6 = u_{12} = u_{18} = u_{24} = u_{25} = u_{26} = u_{27} = u_{28} = u_{29} = 0 \\ v_1 = v_2 = v_3 = v_4 = v_5 = v_6 = v_{11} = v_{12} = v_{17} = v_{18} = v_{23} = v_{24} = v_{29} = 0 \\ w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = w_5 = w_6 = w_{12} = w_{18} = w_{24} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

Điều kiện cực trị của phiếm hàm ràng buộc mở rộng L theo các thành phần chuyển vị chưa biết là:

$$\frac{\partial L}{\partial u_i} = 0 \begin{cases} i = 7 \div 11 \\ i = 13 \div 17 \\ i = 19 \div 23 \end{cases}; \quad \frac{\partial L}{\partial v_j} = 0 \begin{cases} j = 7 \div 10 \\ j = 13 \div 16 \\ j = 19 \div 22 \\ j = 25 \div 28 \end{cases}; \quad \frac{\partial L}{\partial w_k} = 0 \begin{cases} k = 7 \div 11 \\ k = 13 \div 17 \\ k = 19 \div 23 \\ k = 25 \div 29 \end{cases} \quad (14)$$

Từ điều kiện cực trị của phiếm hàm mở rộng L (14) sẽ thiết lập được hệ phương trình gồm 54 phương trình phi tuyến chứa 54 ẩn số là các thành phần chuyển vị của các nút dàn và các thừa số lagrange.

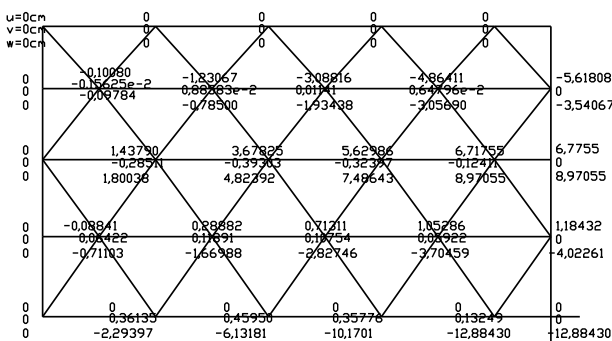
- Xác định các thành phần chuyển vị tại các nút dàn

Giải hệ phương trình (14) tìm được các thành phần chuyển vị tại các nút dàn. Kết quả các thành

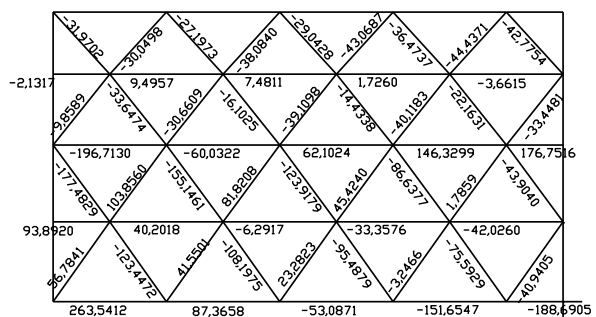
phần chuyển vị tại các nút dàn được thể hiện như hình 4.

- Xác định nội lực trong các thanh dàn

Sau khi xác định được các thành phần chuyển vị tại các nút dàn, sẽ xác định được nội lực trong các thanh dàn. Kết quả nội lực trong các thanh dàn được thể hiện như hình 5.

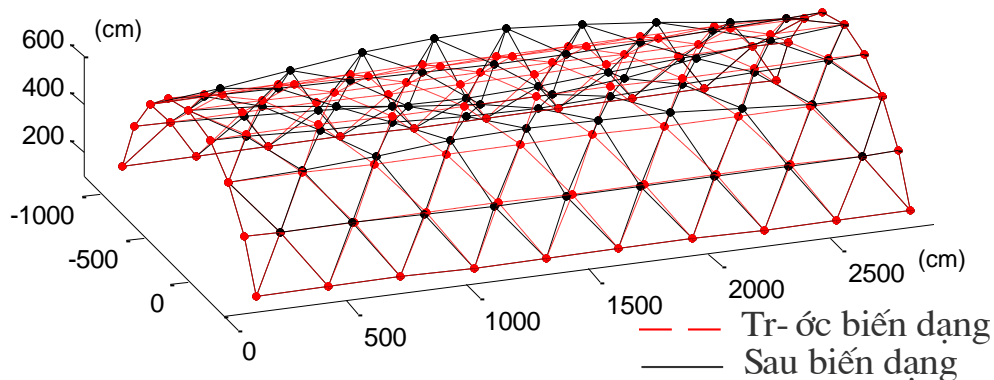


Hình 4. Kết quả các thành phần chuyển vị tại nút dàn (cm)



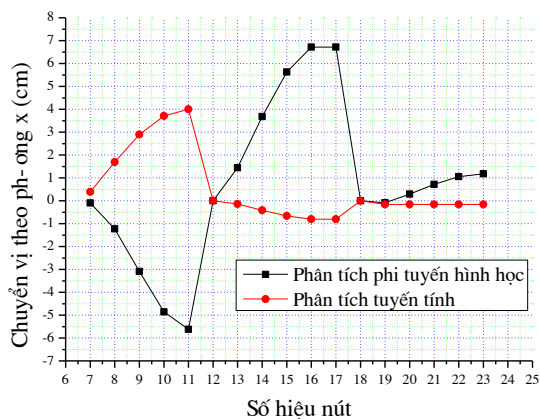
Hình 5. Kết quả nội lực trong các thanh dàn (kN)

- Hình dạng dàn trước và sau khi biến dạng: được thể hiện như hình 6.

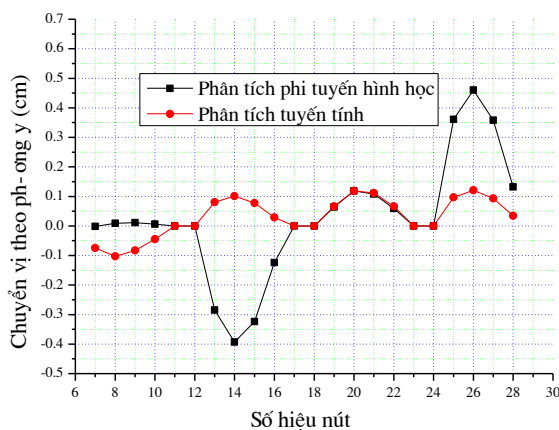


Hình 6. Hình dạng kết cấu dàn trước và sau biến dạng khi $k=1/3$

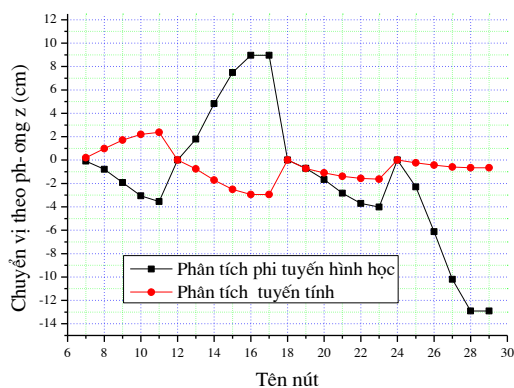
- So sánh giữa kết quả PTPHH và PTTT: Kết quả giữa phân tích PTPHH và PTHH được thể hiện như hình 7, 8, 9, 10.



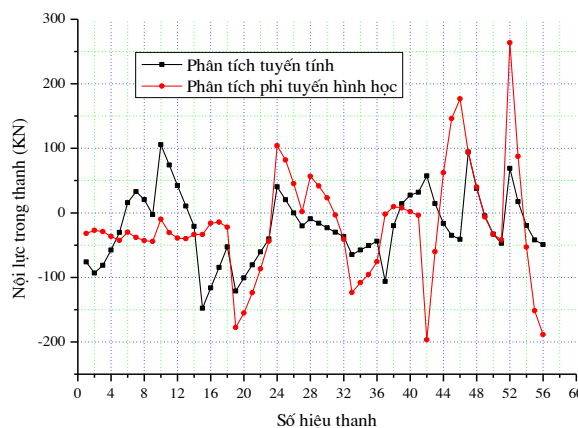
Hình 7. Chuyển vị của nút dàn theo phương x



Hình 8. Chuyển vị của nút dàn theo phương y



Hình 9. Chuyển vị của nút dàn theo phương z



Hình 10. Nội lực trong các thanh dàn

5. Ảnh hưởng độ võng của dàn vòm không gian một lớp loại 1 đến PTCL chuyển vị, nội lực giữa PTTT và PTPHH

Trong mục này, bài báo phân tích bài toán dàn vòm không gian một lớp như (mục 3) nhưng

với các giá trị độ võng khác nhau ($k = 1/3; 1/4; 1/5$).

Kết quả so sánh nội lực, chuyển vị giữa PTTT và PTPHH được thể hiện như trong bảng 1, hình 11, hình 12 và hình 13.

KẾT CẤU - CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG

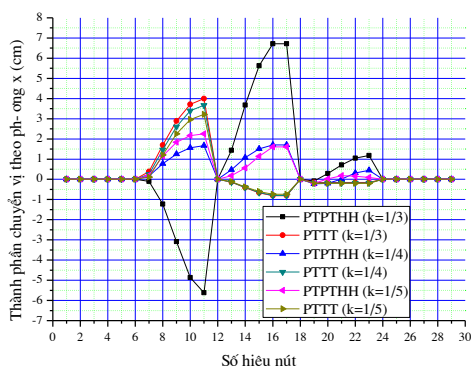
Bảng 1. Kết quả PTCL nội lực trong các thanh giữa PTTT và PTPTHH của dàn vòm không gian một lớp loại 1 ứng với các giá trị $k=f/l$ khác nhau

Thanh	k=1/3		k=1/4		k=1/5	
	Nội lực PTPTHH (kN)	Phần trăm chênh lệch (%)	Nội lực PTPTHH (kN)	Phần trăm chênh lệch (%)	Nội lực PTPTHH (kN)	Phần trăm chênh lệch (%)
1	-31,970	58,009	-79,720	8,359	-102,017	6,045
2	-27,197	70,884	-91,644	9,321	-114,113	5,806
3	-29,043	64,263	-81,759	8,430	-98,618	1,507
4	-36,474	36,807	-63,491	6,994	-75,503	4,193
5	-42,775	41,365	-42,478	4,072	-51,802	10,833
6	-30,050	292,407	-9,331	494,186	-11,672	41,609
7	-38,084	215,787	4,106	67,152	7,231	186,706
8	-43,069	307,548	-4,513	724,038	-6,082	68,054
9	-44,437	1487,059	-21,804	7,428	-28,278	24,355
10	-9,859	109,319	50,717	27,659	57,896	47,879
11	-30,661	141,387	31,269	28,070	36,913	123,494
12	-39,110	192,288	10,708	36,395	6,379	204,248
13	-40,118	475,925	-11,349	15,790	-21,020	26,898
14	-33,448	59,019	-34,582	5,092	-45,038	12,357
15	-33,647	77,243	-124,056	13,237	-158,235	11,489
16	-16,103	86,137	-103,076	11,406	-130,433	9,339
17	-14,434	82,908	-81,220	9,464	-97,626	1,001
18	-22,163	57,977	-58,164	7,784	-69,251	6,447
19	-177,483	46,588	-157,732	32,699	-156,249	29,433
20	-155,146	53,771	-135,644	32,607	-139,079	30,222
21	-123,918	53,530	-106,168	23,860	-125,807	35,443
22	-86,638	43,129	-76,854	11,153	-107,938	36,683
23	-43,904	8,809	-52,378	0,362	-74,970	15,244
24	103,856	157,218	53,623	290,607	26,880	386,302
25	81,821	305,153	24,551	962,665	10,727	146,028
26	45,424	337098,07	-4,949	74,517	-1,846	95,041
27	1,786	108,855	-29,599	17,766	-30,479	40,397
28	56,784	718,170	-18,682	31,456	-14,155	67,774
29	41,550	357,897	-21,970	33,184	-17,100	64,829
30	23,282	201,067	-18,124	52,932	-34,849	34,636
31	-3,2466	89,164	-22,316	49,432	-63,702	9,810
32	-40,941	10,989	-49,760	0,008	-72,803	16,102
33	-123,447	91,130	-79,785	10,420	-110,598	35,725
34	-108,198	87,638	-83,606	25,476	-106,749	39,011
35	-95,488	88,200	-87,639	43,656	-88,357	22,554
36	-75,593	72,538	-78,887	42,445	-70,339	4,360
37	-2,132	97,995	-71,475	17,801	-85,911	18,122
38	9,496	147,435	-12,063	15,784	-11,930	7,305
39	7,481	46,827	9,928	17,192	15,164	48,535
40	1,726	93,676	18,308	14,438	21,941	25,321
41	-3,662	111,506	21,240	13,003	22,550	14,082
42	-196,713	443,020	-20,380	138,145	6,818	85,740
43	-60,032	518,726	-1,015	107,598	-10,311	186,266
44	62,102	479,020	8,644	156,628	-10,446	23,531
45	146,330	520,270	9,811	130,245	6,919	123,837
46	176,752	531,4960	9,356	124,517	18,852	155,202
47	93,892	0,366	121,509	46,307	98,327	36,120
48	40,202	6,651	35,997	8,359	47,393	64,023
49	-6,292	33,529	-20,115	384,412	12,025	432,932
50	-33,358	1,136	-38,163	31,291	-29,442	16,453
51	-42,026	10,808	-32,860	20,867	-71,133	96,947
52	263,541	282,370	124,286	108,067	144,813	181,222
53	87,366	407,034	58,421	291,209	34,774	170,118
54	-53,087	169,583	-16,207	5,036	-49,870	238,960
55	-151,655	262,410	-90,666	149,998	-78,899	152,362
56	-188,690	283,278	-123,875	190,332	-76,008	106,646

KẾT CẤU - CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG

Kết quả tính toán nội lực trong các thanh dàn ứng với các giá trị k khác nhau (bảng 1) cho thấy:

- Với các giá trị k khác nhau đều có sự xuất hiện nội lực trong một số thanh giữa PTTT và PTPTHH hình học là trái dấu;



Hình 11. Biểu đồ chuyển vị theo phương x

Kết quả so sánh các thành phần chuyển vị tại các nút dàn giữa PTTT và PTPTHH cho thấy:

- Chuyển vị lớn nhất tại các nút dàn theo phương trục x theo PTTT: khi k=1/3 là 4,000(cm), khi k=1/4 là 3,667(cm) và khi k=1/5 là 3,215(cm); Chuyển vị lớn nhất tại các nút dàn theo phương trục x theo PTPTHH: khi k=1/3 là 6,718(cm), khi k=1/4 là 1,707(cm) và khi k=1/5 là 2,250(cm).

- Chuyển vị lớn nhất tại các nút dàn theo phương trục y theo PTTT: khi k=1/3 là 0,121(cm), khi k=1/4 là 0,105(cm) và khi k=1/5 là 0,091(cm); Chuyển vị lớn nhất tại các nút dàn theo phương trục y theo PTPTHH: khi k=1/3 là 0,460(cm), khi k=1/4 là 0,252(cm) và khi k=1/5 là 0,238(cm);

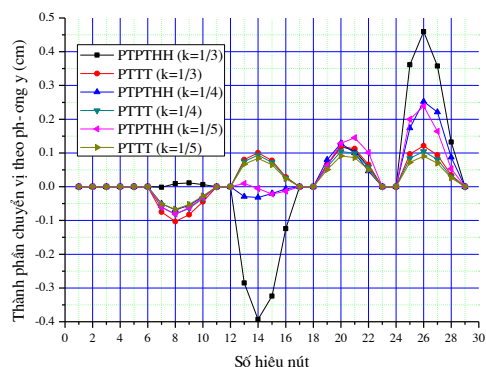
- Chuyển vị lớn nhất tại các nút dàn theo phương trục z theo PTTT: khi k=1/3 là 2,952(cm), khi k=1/4 là 3,433(cm) và khi k=1/5 là 3,749(cm); Chuyển vị lớn nhất tại các nút dàn theo phương trục z theo PTPTHH: khi k=1/3 là 12,884(cm), khi k=1/4 là 6,339(cm) và khi k=1/5 là 5,755(cm).

4. Kết luận

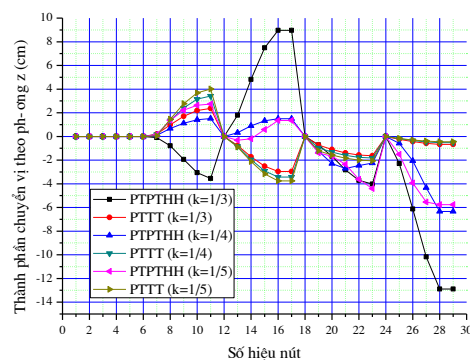
Qua các kết quả phân tích đã trình bày trong bài báo, tác giả có thể đưa ra một số kết luận sau:

- Dựa trên Nguyên lý cực trị Gauss và kết hợp với phần mềm Matlab tác giả đã xây dựng được mô đun chương trình phân tích phi tuyến hình học do

- PTCL giữa nội lực lớn nhất theo PTTT và nội lực lớn nhất theo PTPTHH: khi k=1/3 của thanh xiên là 20,036%, của thanh dọc là 84,995%; khi k=1/4 của thanh xiên là 10,315%, của thanh dọc là 42,460% và khi k=1/5 của thanh xiên là 11,489%, của thanh dọc là 18,122%.



Hình 12. Biểu đồ chuyển vị theo phương y



Hình 13. Biểu đồ chuyển vị theo phương z

kể đến sự thay đổi góc các thanh dàn trong quá trình kết cấu dàn biến dạng cho bài toán dàn vòm không gian chịu tải trọng tĩnh tại các nút dàn;

- Kết quả giữa PTPTHH và PTTT đối với kết cấu dàn vòm không gian một lớp trong các ví dụ khảo sát có sự thay đổi dấu của các thành phần chuyển vị tại một số nút và nội lực trong một số thanh dàn;

- Khi độ vồng của kết cấu càng lớn thì PTCL lớn nhất của nội lực trong các thanh dàn giữa PTTT và PTPTHH càng lớn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Hà Huy Cương (2005), Phương pháp nguyên lý cực trị Gauss, *Tạp chí Khoa học và kỹ thuật*, IV, Tr. 112 ÷ 118.
- Phạm Văn Đạt (2013), Phân tích phi tuyến dàn phẳng dựa trên nguyên lý cực trị Gauss, *Tạp chí xây dựng số 07* (Tr.76-78).

3. Phạm Văn Hội, Nguyễn Quang Viên, Phạm Văn Tư, Đoàn Ngọc Tranh, Hoàng Văn Quang (2006), Kết cấu thép Công trình Dân dụng và Công nghiệp, *Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật*.
4. Vũ Đình Lai, Nguyễn Xuân Lựu, Bùi Đình Nghi (2002), Sức bền vật liệu, *Nhà xuất bản Giao thông vận tải*.
5. Chu Quốc Thắng (1997), Phương pháp phần tử hữu hạn, *Nhà xuất bản Khoa học và kỹ thuật*.
6. Lều Thọ Trình (2003), Cơ học kết cấu, Tập I – Hệ tĩnh định, *Nhà xuất bản Khoa học và kỹ thuật*.
7. Lều Thọ Trình (2003), Cơ học kết cấu, Tập II – Hệ siêu tĩnh, *Nhà xuất bản Khoa học và kỹ thuật*.
8. Phạm Văn Trung (2006), Phương pháp mới tính hệ kết cấu dây và mái treo, *Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Đại học Kiến trúc Hà Nội*.
9. Carlos A.Felippa (2001), Nonlinear finite element methods, *University of Colorado*.
10. Greco M., Menin R.C.G., Ferreira I.P., Barros F.B. (2012), Comparison between two geometrical nonlinear methods for truss analyses, *Structural Engineering and Mechanics, Vol. 41, No.6, p.735-750*.
11. Kwasniewski L. (2009), Complete equilibrium paths for Mises trusses, *International Journal of Non-Linear Mechanics 44, p.19- 26*.
12. Ligaro S.S., Valvo P.S. (2006), Large displacement analysis of elastic pyramidal trusses, *International Journal of Solids and Structures 43, p.4867–4887*.
13. Pajand M.R., Hakkak M.T. (2006), Nonlinear analysis of truss structures using dynamic relaxation, *Int. J. Numer. Meth. Engng., Vol. 19, No. 1, p.11-22*.
14. S.E.Kim (1998), Direct design of truss bridges using advanced analysis, *Structural Engineering and Mechanics*.
15. S.Z.Shen, T.T.Lan (2001), A Review of the development of Spatial Structures, *China International Journal of Space Structures, (3):157-172*.
16. 张毅刚,薛素铎,杨庆山(2004), *大跨空间结构*,机械工业出版社.

Ngày nhận bài: 08/4/2021.

Ngày nhận bài sửa: 26/4/2021.

Ngày chấp nhận đăng: 29/4/2021.

0