

SO SÁNH CÁC PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH TẢI TRỌNG SÓNG NỔ TÁC DỤNG LÊN CÔNG TRÌNH NỔI: GIÁO TRÌNH VÀ TIÊU CHUẨN UFC 3-340-02
COMPARISON OF BLAST LOAD ESTIMATION METHODS FOR ABOVE-GROUND STRUCTURES: TEXTBOOK VS. UFC 3-340-02

VŨ ĐỨC HIẾU^a, NGÔ NGỌC THỦY^{a,*}, VŨ QUỐC PHONG^b, TRẦN LINH KHƯƠNG^a

^aHọc viện Kỹ thuật quân sự

^bBinh chủng Công binh

*Tác giả đại diện: Email: ngocthuyn.g@lqdtu.edu.vn, ĐT: 0982308023

Ngày nhận 18/3/2026, Ngày sửa 28/3/2026, Chấp nhận 30/3/2026

<https://doi.org/10.59382/j-ibst.2026.vi.vol1-9>

Tóm tắt: Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu phát triển chương trình số hóa và tự động hóa tính toán, so sánh tải trọng sóng nổ tác động lên công trình nổi. Nghiên cứu được thực hiện dựa trên việc đối chiếu hai nguồn tài liệu cốt lõi: giáo trình Công sự và tiêu chuẩn quân sự Hoa Kỳ (UFC 3-340-02). Kết quả phân tích cho thấy phương pháp trong giáo trình Công sự dựa trên các công thức giải tích đơn giản, thuận tiện cho việc tính nhanh nhưng chưa bao quát được các hiện tượng vật lý phức tạp như ảnh hưởng của góc tới hay pha âm của sóng nổ. Ngược lại, tiêu chuẩn UFC 3-340-02 thiết lập quy trình tính toán có độ chi tiết và chính xác cao hơn nhờ tích hợp dữ liệu thực nghiệm số hóa, đồng thời xét đến hiệu ứng giải tỏa áp lực và đặc tính hình học riêng biệt của từng bề mặt công trình. Đáng chú ý, sai lệch về áp lực cực đại giữa hai phương pháp dao động từ 5% đến 25% tùy vị trí, nhưng có sự khác biệt rất lớn về xung lực và quy luật biến thiên của biểu đồ thời gian. Trên cơ sở đó, nghiên cứu kiến nghị áp dụng các dữ liệu và quy trình theo tiêu chuẩn UFC 3-340-02 trong thiết kế chi tiết nhằm tối ưu hóa chi phí đầu tư và nâng cao độ tin cậy cho các công trình phòng thủ dân sự tại Việt Nam.

Từ khóa: tải trọng sóng nổ, công trình nổi, số hóa dữ liệu, UFC 3-340-02, giáo trình Công sự, phòng thủ dân sự, xung lực sóng nổ, sóng xung kích, sóng tới, sóng phản xạ.

Abstract: This paper presents the development of a data digitization and automated calculation program designed to evaluate and compare blast wave loads on floating structures. The methodology integrates two primary technical frameworks: the Vietnamese Fortification curriculum and the U.S. Unified Facilities Criteria (UFC 3-340-02). The findings indicate that while the Fortification curriculum offers straightforward analytical formulas for ease of application, it lacks considerations for complex physical variables such as the angle of incidence and the negative phase of the blast wave.

In contrast, UFC 3-340-02 provides a more rigorous approach, utilizing digitized experimental datasets that account for pressure clearing effects and surface-specific structural characteristics. A comparative analysis shows that peak overpressure deviations between the two methods range from 5% to 25% depending on the location; however, significant discrepancies were observed in impulse values and pressure-time history profiles. Consequently, the study recommends adopting UFC 3-340-02 data for detailed engineering designs to optimize construction costs and enhance the reliability of civil defense infrastructure in Vietnam.

Keywords: Blast load, Floating structures, Data digitization, UFC 3-340-02, Fortification curriculum, Civil defense, Blast impulse, Shock wave, Incident wave, Reflected wave.

1. Đặt vấn đề

Trong bối cảnh tình hình địa chính trị thế giới diễn biến phức tạp, việc bảo đảm an ninh quốc gia và an toàn cho nhân dân trước các nguy cơ khủng bố, xung đột vũ trang là nhiệm vụ cấp thiết. Luật Phòng thủ dân sự năm 2023 ra đời đã nhấn mạnh tầm quan trọng của việc chuẩn bị từ sớm, từ xa, đặc biệt là thiết kế và xây dựng các công trình phòng thủ dân sự. Một trong những thách thức lớn nhất trong thiết kế các công trình này là xác định chính xác tải trọng sóng nổ - một loại tải trọng động có tính chất phức tạp, biến đổi nhanh theo thời gian và không gian.

Tính toán kết cấu công trình phòng thủ dân sự chịu tác dụng của tải trọng nổ là một nhiệm vụ trọng tâm của ngành công trình quốc phòng. Để từng bước xây dựng quy chuẩn hướng dẫn tính toán, đòi hỏi Việt Nam cần nghiên cứu, xây dựng phương pháp và quy trình tự động tính toán tải trọng động do nổ gây ra. Trên thế giới, các tài liệu và tiêu chuẩn tính toán tải trọng được đề cập nhiều và đã được triển khai theo phương pháp công thức thực nghiệm giải tích dựa trên các đường hồi quy tuyến tính hoặc theo dữ

liệu số hóa. Trong tài liệu kinh điển của Sadovskiy “Mechanical effects of air shockwaves from explosions according to experiments” [1], các giá trị áp lực cực đại của sóng tới nổ tự do trên không, nổ trên mặt đất, áp lực sóng phản xạ, giá trị duy trì pha nén, xung lực dương đều được tính toán theo các công thức thực nghiệm và là một trong các tài liệu trích dẫn chính trong giáo trình công sự. Ngoài Shadovskiy, các công thức thực nghiệm khác của Kingery and Bulmash, Kinney and Graham, Henrych and Major, và nhiều tác giả khác cũng được mô tả và kiểm định chi tiết trong các nghiên cứu [2], [3]. Ở Hoa Kỳ, các tài liệu hướng dẫn tính toán chống khủng bố phục vụ các công trình dân sự [4], [5] cũng sử dụng các kết quả nghiên cứu tính toán tải trọng nổ của UFC và TM 5-855-1 và dựa trên nền tảng công thức thực nghiệm và dữ liệu thực nghiệm của Kingery and Bulmash. Tuy nhiên, đến phiên bản UFC 03-340-02, tiêu chuẩn hợp nhất liên ngành, các dữ liệu không còn được thể hiện trong các công thức thực nghiệm mà là dữ liệu số tính toán và tra cứu trực tiếp. Trong khi đó, các tài liệu cập nhật mới nhất về tính toán phòng thủ dân sự có kể tới tải trọng nổ cũng được thể hiện rõ trong tiêu chuẩn mới nhất của Nga [6].

Hiện nay, tại Việt Nam, các kỹ sư thường tham khảo hai nguồn tài liệu chính: hệ thống giáo trình công sự [7] dựa trên lý thuyết của Nga (Liên Xô cũ) và tiêu chuẩn UFC 3-340-02 của Hoa Kỳ [8]. Tuy nhiên, mỗi phương pháp lại có những giả thiết, mô hình toán học và phạm vi áp dụng khác nhau, dẫn đến sự lúng túng trong việc lựa chọn tiêu chuẩn thiết kế tối ưu. Phương pháp tính tải trọng theo tài liệu [7] thiên về các công thức giải tích thực nghiệm đơn giản, trong khi tiêu chuẩn Hoa Kỳ lại dựa trên hệ thống dữ liệu thực nghiệm số hóa chi tiết, có tính đến các hiện tượng vật lý như pha âm hay sự giải tỏa áp lực.

Bài báo này tập trung nghiên cứu phương pháp

tính toán tải trọng động do nổ tác động lên công trình không có lỗ thoáng theo các công thức giải tích thực nghiệm của tài liệu [7] và phát triển chương trình tự động tính tải trọng theo chu trình tính của UFC 03-04-02. Việc nghiên cứu, xây dựng một chương trình tự động tính toán để so sánh định lượng kết quả giữa hai phương pháp này là hết sức cần thiết. Điều này không chỉ giúp các đơn vị thiết kế nắm rõ bản chất sai lệch của các mô hình mà còn là cơ sở khoa học quan trọng để đề xuất phương án tính toán tải trọng phù hợp, vừa đảm bảo an toàn chịu lực, vừa tối ưu hóa chi phí xây dựng cho các công trình phòng thủ dân sự tại Việt Nam.

2. Cơ sở lý thuyết

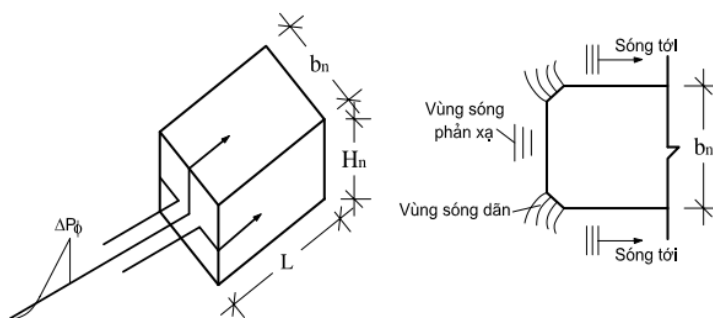
2.1 Tính toán tải trọng sóng nổ theo giáo trình công sự

Với công trình đặt trên mặt đất, áp lực tác dụng lên công trình nổ bao gồm áp lực tải trọng động tác dụng lên tường trước, áp lực lên tường bên và áp lực lên tường sau. Trong trường hợp nổ gần, tải trọng sóng tới do vụ nổ sau khi lan truyền trong không khí sẽ tương tác với công trình. Tùy theo khoảng cách giữa công trình và vụ nổ, áp lực tính toán lên kết cấu sẽ được tính toán.

Trong điều kiện nổ gần, chỉ có công thức tính toán với áp lực sóng hạt nhân và coi tất cả các tải trọng tại các điểm trên mặt, tường, nóc bằng nhau và coi như chịu tác dụng của siêu áp sóng phản xạ phẳng.

Với trường hợp nổ xa, các công thức tính toán áp lực lên tường trước, tường bên và tường sau với công trình nổi trên mặt đất được với giả thiết mục tiêu trong khu xa và áp lực sóng tới vuông góc với mặt phản xạ. Áp lực tính toán là giá trị trung bình, đại diện cho toàn bộ mặt tương tác [1], [8],[15], [16].

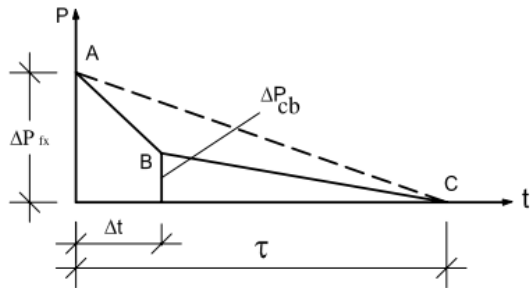
2.1.1 Tải trọng tác dụng lên mặt tường trước



Hình 1. Sơ đồ lan truyền của sóng nổ với công trình nổi [7]

Do sự chênh lệch áp suất giữa tường trước, tường bên và nóc, các phần tử không khí sẽ chuyển động về

phía nóc và tường bên, làm xuất hiện sóng dẫn. Biểu đồ áp lực tác dụng lên tường trước theo Hình 2.



Hình 2. Biểu đồ áp lực tác dụng lên tường trước [7]

Trong trường hợp sóng tới vuông góc với bề mặt tường chịu tải, giá trị cực đại của áp lực sóng phản xạ tính toán theo công thức:

$$\Delta P_{fx} = 2\Delta P_{\phi} + \frac{6\Delta P_{\phi}^2}{\Delta P_{\phi} + 7.2} \quad (1)$$

trong đó:

ΔP_{fx} là giá trị cực đại của áp lực sóng phản xạ, kG/cm²;

ΔP_{ϕ} là giá trị cực đại của áp lực sóng tới, kG/cm².

Biểu đồ gồm 2 đoạn thẳng:

- Đoạn AB biểu diễn biến thiên của áp lực khi hình thành qui luật chảy bao;

- Đường BC biểu diễn biến thiên của áp lực sau khi hình thành qui luật chảy bao.

Thời gian cần thiết để sóng chảy bao theo chiều rộng b_n và chiều cao H_n của công trình xác định theo công thức:

$$\Delta t = \min\left(\frac{b_n}{2C}, \frac{H_n}{C}\right) \quad (2)$$

trong đó:

C là tốc độ âm trong vùng khí nén m/s;

b_n là chiều rộng của công trình, m;

H_n là chiều cao của công trình, m.

$$C = C_0 \sqrt{\frac{(\overline{\Delta P_{\phi}} + 1)(\overline{\Delta P_{\phi}} + 7)}{6\overline{\Delta P_{\phi}} + 7}} \quad (3)$$

$$\overline{\Delta P_{\phi}} = \Delta P_{fx} \left(0.75 - 0.35 \frac{\Delta t}{\tau}\right) \quad (4)$$

Trong nhiều trường hợp $\frac{\Delta t}{\tau} \ll 1$ cho nên có thể

lấy $\overline{\Delta P_{\phi}} = 0.75\Delta P_{fx}$.

C_0 là tốc độ âm trong không khí, m/s; $C_0 = 340$ (m/s).

Hiện tượng chảy bao chỉ xuất hiện khi $\Delta t < \tau$.

Giá trị áp lực sóng chảy bao xác định theo công thức:

$$\Delta P_{cb} = \Delta P_{\phi} + (1 + \varepsilon) \frac{2.5\Delta P_{\phi}^2}{\Delta P_{\phi} + 7} \quad (5)$$

trong đó:

ΔP_{cb} là giá trị cực đại của áp lực sóng chảy bao, kG/cm²;

$$\Delta P_t = \Delta P_{\phi} \left(1 - \frac{\Delta t}{\tau}\right) \quad (6)$$

Trường hợp siêu áp $\Delta P_{\phi} \leq 4 \text{ kG/cm}^2$ có thể tính:

$$\Delta P_{cb} = \frac{\Delta P_{fx}}{2} \left(1 - \frac{\Delta t}{\tau}\right) \quad (7)$$

ε là hệ số phụ thuộc trị số Ma-Kha M (bảng 1).

Bảng 1. Bảng xác định trị số ε

M	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
ε	0.0025	0.01	0.02	0.04	0.05	0.09	0.13	0.17	0.22
M	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.4	2.6	3
ε	0.27	0.4	0.49	0.56	0.61	0.66	0.73	0.76	0.77

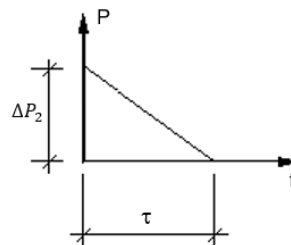
Trị số M xác định theo công thức sau:

$$M = \frac{1.86\overline{\Delta P_{\phi}}}{\sqrt{(\overline{\Delta P_{\phi}} + 1)(\overline{\Delta P_{\phi}} + 7)}} \quad (8)$$

2.1.2 Tải trọng tác dụng lên tường bên và nóc

Đối với tường bên và nóc, sóng chỉ lướt qua, không xảy ra hiện tượng phản xạ, do đó áp lực tác dụng lên tường bên và nóc bằng áp lực sóng tới.

$$\Delta P_2 = \Delta P_{\phi} \quad (9)$$



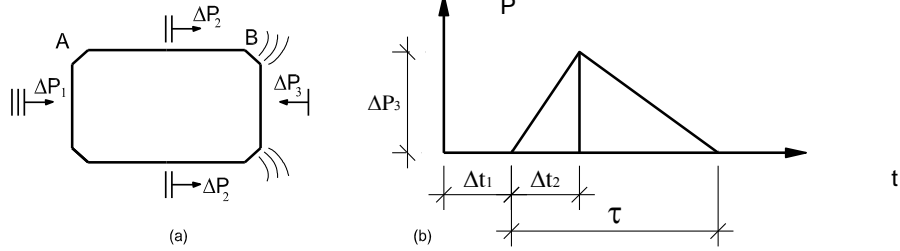
Hình 3. Biểu đồ áp lực tác dụng lên tường bên và nóc [7]

trong đó:

ΔP_2 là giá trị cực đại của áp lực tác dụng lên tường bên và nóc, kG/cm².

2.1.3 Tải trọng tác dụng lên tường sau

Khi sóng xung kích di chuyển đến mép biên tường bên và tường sau (hoặc mép biên nóc và tường sau)



Hình 4. Biểu đồ áp lực tác dụng lên tường sau [7]
 a. Hiện tượng sóng chảy vòng vào tường sau; b. Biểu đồ áp lực tác dụng lên tường sau

Thời gian cần thiết để sóng xung kích di chuyển từ điểm A đến điểm B là:

$$\Delta t_1 = \frac{L}{D_\Phi} \tag{10}$$

trong đó:

L là chiều dài công trình theo hướng di chuyển của sóng, m;

D_Φ là tốc độ chuyển động của mặt sóng, m/s.

Thời gian áp lực tăng từ 0 đến giá trị lớn nhất là:

$$\Delta t_2 = \frac{b}{2C} \tag{11}$$

Trị số áp lực lớn nhất tác dụng lên tường sau theo kết quả thực nghiệm bằng 2/3 áp lực sóng tới.

$$\Delta P_3 = \frac{2}{3} \Delta P_\Phi \tag{12}$$

trong đó:

ΔP_3 là giá trị cực đại của áp lực tác dụng lên tường sau, kG/cm².

Nhận xét: Phương pháp tính toán theo công thức giải tích thực nghiệm trên có ưu điểm là đơn giản, dễ sử dụng và hiện tại đang được sử dụng rộng rãi trong tính toán kết cấu công trình do tính tin cậy và đơn giản của chúng. Tại Việt Nam, trong giảng dạy môn học Công sự tại Học viện Kỹ thuật Quân sự, trong các tài liệu giáo trình hoặc các tài liệu hướng dẫn tính toán thiết kế công trình chịu tác dụng của tải trọng nổ, sổ tay công binh, và hầu hết các công trình nghiên cứu trong tính toán công trình chịu tác dụng của tải trọng do sóng nổ gây ra đều thừa nhận và bắt đầu bằng công thức thực nghiệm trên [13]. Tuy nhiên, với các công thức thực nghiệm trên chưa thể hiện rõ được phạm vi giới hạn và áp dụng của công thức. Mặt khác, để thiên về đơn giản việc tính toán áp lực cực đại tác dụng lên tường sau là 2/3 giá trị

sẽ xảy ra hiện tượng chảy vòng vào giữa tường sau và gây ra áp lực tác dụng lên tường sau. Áp lực này tăng từ 0 đến giá trị cực đại sau đó lại giảm xuống 0.

áp lực sóng tới mà chưa làm rõ bản chất hiện tượng truyền sóng. Trong khi đó, dữ liệu thực nghiệm của UFC 3-340-02 được sử dụng rộng rãi trên thế giới có dữ liệu đầy đủ hơn so với các công thức trên đang dùng tại Việt Nam. Khác với tài liệu [7] dựa trên các nghiên cứu của Sadvovskiy, dữ liệu của tiêu chuẩn UFC 3-340-02 được phát triển trên nghiên cứu Kingery-Bulmash. Kingery-Bulmash đã thực hiện hàng loạt thí nghiệm nổ từ quy mô nhỏ đến quy mô lớn (với TNT) để xây dựng các đường cong thực nghiệm dưới dạng đa thức bậc cao. UFC 3-340-02 để tăng độ chính xác đã không sử dụng phương pháp nội suy đa thức mà cung cấp dữ liệu số hóa trực tiếp. Dữ liệu này đều được tích hợp trong chương trình tính như CONWEP của ABAQUS hay Blast enhanced của LS-DYNA đang dùng phổ biến trên thế giới [9], [10], [11].

2.2 Tính toán áp lực lên công trình nổ trên mặt đất theo phương pháp UFC 3-340-2

2.2.1 Tải trọng tác động lên tường trước

Mặt trước công trình chịu tác dụng của áp lực sóng phản xạ, nhưng áp lực này sẽ bị suy giảm nhanh chóng do hiệu ứng giải tỏa từ khi sóng chảy ra vùng biên. Áp lực cực đại tác dụng lên mặt trước của công trình vào thời điểm sóng nổ đến sẽ là áp lực cực đại do phản xạ (P_r), là một hàm của áp lực sóng tới ban đầu. Áp lực này sau đó giảm trong khoảng thời gian t_c do sóng truyền qua phía trên và xung quanh công trình, với giá trị nhỏ hơn P_r (áp lực vượt quá đỉnh trên và xung quanh công trình sẽ là P_s). Áp lực vượt quá trên bề mặt phía trước của công trình tiếp tục giảm cho đến khi áp lực cân bằng với áp lực của không khí xung quanh (thời điểm t_{of}).

Khác với tài liệu [7] sử dụng các công thức thực nghiệm thiên về đơn giản, an toàn, tài liệu UFC 3-04-

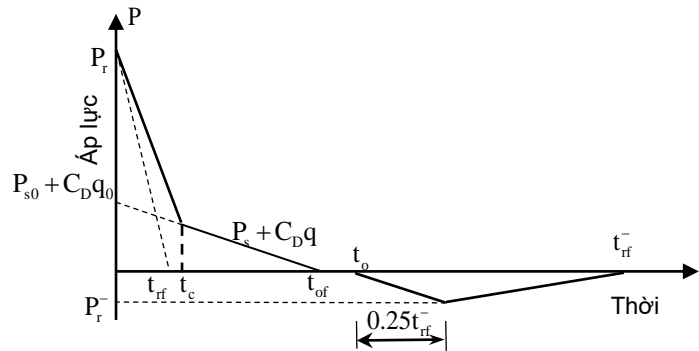
QUY CHUẨN - TIÊU CHUẨN

02 xây dựng quy trình chặt chẽ tính toán các tham số của tải trọng:

- Xác định thời gian giải tỏa (t_c - Clearing time);
- Xác định áp lực cực đại tác dụng lên mặt trước là giá trị nhỏ nhất giữa áp lực phản xạ (P_r) và áp lực giải tỏa (P_c) tại thời điểm t ;

- Xác định biểu đồ tải trọng tác dụng lên mặt trước công trình.

Do biểu đồ phức tạp trên thường được quy đổi về dạng tam giác tương đương có cùng xung lượng và áp lực đỉnh.



Hình 5. Biểu đồ tải trọng tác dụng lên mặt trước công trình [12]

trong đó:

P_r là áp lực cực đại của sóng phản xạ pha nén, psi; P_{s0} là áp lực cực đại của sóng tới, psi; P_r^- là áp lực cực đại của sóng phản xạ pha giãn, psi; P_s là áp lực hãm, psi; P_s là áp lực hãm, psi; P_c là áp lực chảy bao, psi; q là áp lực động cực đại, psi; q_0 là áp lực động cực đại sóng tới, psi; t_r là xung pha dương của sóng nổ; C_D là hệ số dịch chuyển; t_0 là thời gian duy trì pha dương của sóng nổ, ms; t_c là thời gian giải tỏa, ms; t_{rf} là thời gian duy trì áp lực pha dương của sóng phản xạ, ms; t_{rf}^- là thời gian duy trì pha âm của sóng phản xạ, ms. t_{of} là thời gian duy trì tải quy đổi, ms.

2.2.2 Tải trọng tác dụng lên tường bên và nóc

Giống với các tài liệu [7], UFC 3-340-02 chấp nhận giả thiết tải trọng phân bố đều tác dụng đồng thời lên toàn bộ bề mặt nóc/tường bên. Vì sóng nổ di chuyển từ phía trước ra phía sau công trình, nên khi

xác định các thông số của sóng thì tính khoảng cách quy đổi Z tương ứng tại vị trí mép trước của nóc hoặc tường bên. Sau khi đã xác định các thông số đầu vào, thực hiện các bước tính toán như sau:

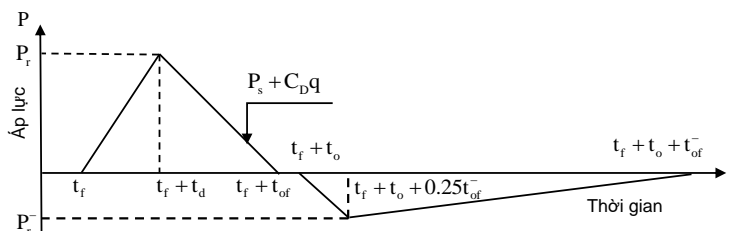
- Tính tỷ lệ giữa chiều dài bước sóng tại mép trước (L_w) và chiều dài nhịp của cấu kiện (L) dọc theo hướng truyền sóng (L_{wf}/L);

- Xác định các hệ số tải trọng tương đương (C_E), thời gian tăng tải quy đổi (t_d), thời gian duy trì tải quy đổi (t_{of}) dựa trên nội suy dữ liệu từ Figure 2-196 đến Figure 2-198 của UFC 3-340-02 [12];

- Xác định áp lực động cực đại (q_{of}) và hệ số cản (C_D);

- Tính toán áp lực đỉnh tổng hợp (P_r) $P_r = C_E \cdot P_{sof} + C_D \cdot q_{of}$.

Áp lực – Thời gian của tải trọng động tác dụng lên tường bên/nóc công trình thể hiện trong Hình 6.



Hình 6. Biểu đồ tải trọng tác dụng lên mặt tường bên/nóc công trình [12]

trong đó:

P_s là áp suất sóng tới, psi; q là áp lực động tại của sóng tới, psi; C_D là hệ số cản; t_r là thời gian bắt

đầu nhận tải, ms; t_0 là thời gian duy trì pha nén, ms; t_{of} là thời gian duy trì tải quy đổi pha nén, ms; t_d là thời gian tăng tải quy đổi, ms; t_{of}^- là thời gian duy trì tải quy đổi pha giãn, ms.

2.2.3 Tải trọng tác dụng lên tường sau

Tải trọng động hình thành do sóng nổ tràn qua từ nóc và các tường bên, tạo ra các sóng thứ cấp bao trùm lên tường sau. Vì sóng nổ tràn qua nóc, nên khi xác định các thông số của sóng thì tính khoảng cách quy đổi Z tương ứng tại vị trí mép sau của nóc hoặc tường bên. Để tính áp lực động tác động lên tường sau được tính theo các bước:

- Tính tỷ lệ giữa chiều dài bước sóng tại mép sau (L_{wb}) và chiều cao tường sau của cấu kiện (H_s) dọc theo hướng truyền sóng (L_{wb} / H_s);

- Xác định các hệ số: Dựa vào tỷ số (L_{wb} / H_s), tương tự đối với tường bên/nóc xác định hệ số tải

trọng tương đương (C_E), thời gian tăng tải quy đổi (t_d), thời gian duy trì tải quy đổi (t_{of});

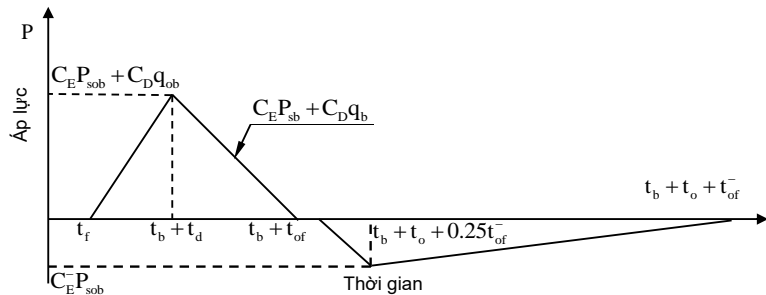
- Xác định áp lực động cực đại (q_{of}) và hệ số cản (C_D). Tra cứu tương tự đối với tường bên/nóc, chỉ khác sử dụng áp lực sóng tới ban đầu (P_{sob}) thay vì (P_{sof});

- Tính toán áp lực đỉnh tổng hợp (P_R).

Áp lực đỉnh tác dụng lên tường sau là tổng đại số của áp lực tới tương đương và áp lực cản:

$$P_R = C_E \cdot P_{sob} + C_D \cdot q_{ob}$$

- Biểu đồ Áp lực – Thời gian của tải trọng động tác dụng lên tường sau công trình thể hiện trong hình 7.



Hình 7. Biểu đồ tải trọng tác dụng lên mặt tường sau công trình [12]

trong đó:

P_{sob} là áp suất tới cực đại tại mặt sau, psi; P_{sb} là áp suất tới tức thời tại mặt sau, psi; q_{ob} là áp lực động cực đại, psi; q_b là áp lực động tức thời, psi; C_E là hệ số tải trọng tương đương; C_D là hệ số cản; t_f là thời gian bắt đầu nhận tải, ms; t_b là thời gian bắt đầu nhận tải, ms; t_o là thời gian duy trì pha nén, ms; t_{of} là thời gian duy trì tải quy đổi pha nén, ms; t_d là thời gian tăng tải quy đổi, ms; t_{of}^- là thời gian duy trì tải quy đổi pha dãn, ms.

+ Trong pha âm, áp lực động tác dụng lên tường sau thường được bỏ qua hoặc xem như không đáng kể so với áp lực tĩnh âm.

2.3 Thuật toán tự động tính tải trọng

Phương pháp theo tài liệu [7] đơn giản với nhiều giả thiết đơn giản hóa để thuận lợi tính nhanh. Tuy nhiên, giới hạn và điều kiện của công thức thực nghiệm chưa thể hiện rõ và chưa khảo sát được với trường hợp góc tới khác 0. Đặc biệt, các giả thiết về áp lực sóng tới tác dụng lên tường bên, tường nóc và tường sau đã bỏ qua ảnh hưởng của gió động. Ngược lại, tiêu chuẩn UFC 3-340-02 tuy giới thiệu đầy đủ các loại tải trọng nổ tương tác với công trình nhưng chu trình tính toán rất phức tạp, mất thời gian,

liên tục tra bảng thủ công và xây dựng hàm tính toán, không thuận lợi cho người dùng sử dụng và khảo sát dữ liệu lớn. Để tự động tính toán được không chỉ cho bài toán tải trọng tác động tới công trình nổi, mà còn với các bài toán nổ tự do, nổ kín, bài toán tính toán kết cấu công trình sau này, dữ liệu nén trong dplot và dữ liệu đồ thị cần phải được xử lý số hóa và lưu trữ dạng cấu trúc trong môi trường python theo các bước sau:

Bước 1: Số hóa và chuẩn hóa dữ liệu. Dplot lưu các dữ liệu dạng file text thô có cấu trúc phân lớp. Sử dụng thư viện pandas đọc dữ liệu text thành cấu trúc dữ liệu dictionary phục vụ nội suy, tra cứu hoặc hỏi quy. Với các figure chưa có dữ liệu số mô tả pha giãn của sóng nổ lan truyền lên tường trước và tường bên, chuyển đổi dữ liệu ảnh thô và tự động nhận dạng dữ liệu, chuyển đổi dữ liệu thành tập X, Y.

Bước 2: Sử dụng thư viện matplotlib vẽ lại các biểu đồ từ dữ liệu trên. So sánh với ảnh và cấu trúc dữ liệu đã có của dplot.

Bước 3: Sử dụng thư viện scipy để xây dựng các hàm nội suy 1D, 2D, 3D. Xây dựng các hàm fitdata để xây dựng các hàm hỏi quy.

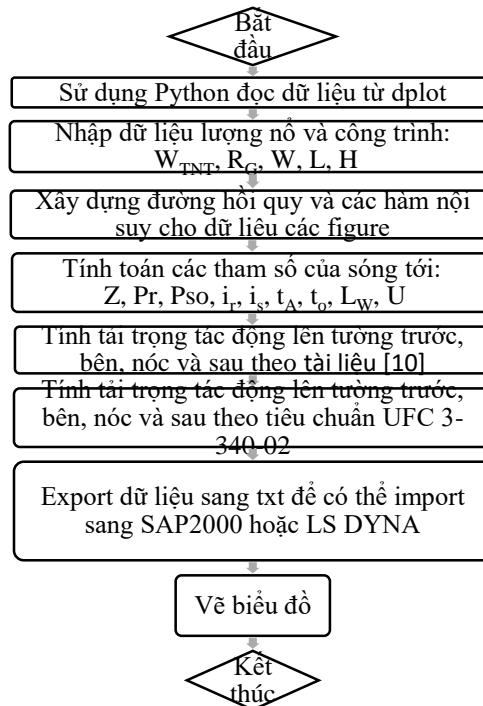
QUY CHUẨN - TIÊU CHUẨN

Bước 4: Tự động đọc toàn bộ dữ liệu của UFC và số hóa thành hệ thống dữ liệu trong môi trường python. Lưu dữ liệu phục vụ các bài toán tính toán tải trọng và các bài toán tính toán kết cấu sau này.

Sau khi có dữ liệu chuẩn hóa, nội dung công tác tính toán tải trọng theo tài liệu được tính theo công thức, nội dung tính toán tải trọng động theo UFC

được tính toán tự và kiểm tra các điều kiện tính toán theo mục 2.2.

Phương pháp tự động tính toán tham số tải trọng nổ với trường hợp công trình không có lỗ thoáng, lượng nổ bên ngoài trên mặt đất được phát triển theo sơ đồ khối sau:

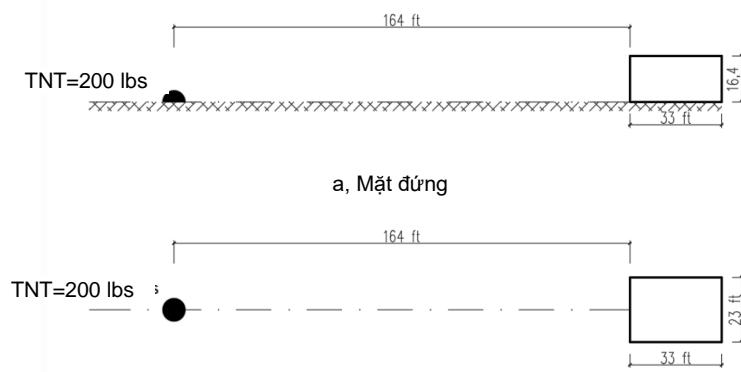


Hình 8. Sơ đồ khối tính toán tải trọng nổ tác dụng lên công trình nổi

3. Tính toán tải trọng động lên công trình

Xác định tải trọng động của tải trọng nổ trên mặt đất với công trình nổi dạng hình hộp chữ

nhật trên mặt đất. Lượng nổ giả thiết do bom xe có đương lượng nổ tương đương với 200 lbs TNT.



Hình 9. Sơ đồ bố trí, Mặt bằng đặt TNT trên mặt đất

Khoảng cách từ lượng nổ tới mặt trước R = 50 m (164 ft).

Công trình có kích thước LxBxH = 10x7x5 (m) = 33x23x16.4 (ft).

Lượng nổ được khảo sát có giá trị W = [200 300

400 500 600 700 800] lbs.

3.1 Tính toán theo phương pháp của Nga

Sử dụng các công thức thực nghiệm từ (1) đến (12), các tham số và kết quả tính toán áp lực cực đại, xung áp lực được thể hiện trong các bảng tính 1 đến 2.

QUY CHUẨN - TIÊU CHUẨN

Bảng 1. Tham số tải trọng động tác dụng lên tường trước

Lượng nổ (lbs)	ΔP_{ϕ} (kG/cm ²)	ΔP_{fx} (kG/cm ²)	$\overline{\Delta P_{\phi}}$ (kG/cm ²)	Δt (s)	τ (s)	ΔP_t (kG/cm ²)	ΔP_{cb} (kG/cm ²)	I (kG.s/m ²)
200	0.14	0.3	0.23	0.01	0.013	0.03	0.03	0.0017
300	0.17	0.36	0.27	0.01	0.024	0.1	0.11	0.0031
400	0.2	0.43	0.32	0.01	0.025	0.12	0.13	0.0038
500	0.22	0.48	0.36	0.01	0.026	0.14	0.15	0.0044
600	0.24	0.53	0.4	0.01	0.027	0.15	0.17	0.0049
700	0.26	0.57	0.43	0.01	0.028	0.17	0.18	0.0054
800	0.28	0.62	0.47	0.01	0.028	0.18	0.2	0.0059

Bảng 2. Tham số tải trọng động tác dụng lên tường bên, nóc và tường sau

Lượng nổ (lbs)	Tường bên và nóc				Tường sau				
	ΔP_2 (kG/cm ²)	τ (s)	n	I (kG.s/m ²)	ΔP_3 (kG/cm ²)	D ϕ (m/s)	Δt_1 (s)	Δt_2 (s)	I (kG.s/m ²)
200	0.14	0.013	1	0.0009	0.09	359.21	0.02	0.01	0.0006
300	0.17	0.024	1	0.002	0.11	363.2	0.02	0.01	0.0013
400	0.2	0.025	1	0.0025	0.13	367.14	0.02	0.01	0.0016
500	0.22	0.026	1	0.0029	0.15	369.74	0.02	0.01	0.002
600	0.24	0.027	1	0.0032	0.16	372.33	0.02	0.01	0.0022
700	0.26	0.028	1	0.0036	0.17	374.9	0.02	0.01	0.0024
800	0.28	0.028	1	0.0039	0.19	377.45	0.02	0.01	0.0027

3.2 Tính toán theo phương pháp UFC 3-340-2

Bảng 3. Tham số tải trọng động tác dụng lên tường trước

Lượng nổ	P_{so} (psi)	C_r (ft/ms)	S (ft)	G (ft)	t_c (ms)	t_{of} (ms)	q_0 (psi)	C_D	P_{max} (psi)	t_{if} (ms)
200	1.86	1.15	11.5	16.4	23.51	19.56	0.1	1	1.96	14.85
300	2.23	1.15	11.5	16.4	23.51	21.31	0.12	1	2.35	16.06
400	2.56	1.16	11.5	16.4	23.31	22.39	0.16	1	2.72	16.96
500	2.85	1.16	11.5	16.4	23.31	23.28	0.2	1	3.05	17.7
600	3.12	1.17	11.5	16.4	23.11	23.95	0.23	1	3.35	18.21
700	3.37	1.17	11.5	16.4	23.11	24.5	0.27	1	3.64	18.52
800	3.6	1.18	11.5	16.4	22.91	25.01	0.31	1	3.91	18.93

Bảng 4. Tham số tải trọng động tác dụng lên tường bên

P_{sof} (psi)	P_{sof} (kG/cm ²)	L (ft)	L_w/L (ft)	C_E	$t_d/W^{1/3}$ (ms/lb ^{1/3})	t_d (ms)	$t_{of}/W^{1/3}$ (ms/lb ^{1/3})	t_{of} (ms)	q_0 (psi)	C_D	P_R (psi)
1.86	0.13	11.5	1.92	0.66	1.81	10.58	5.29	30.94	0.1	-0.4	1.19
2.23	0.16	11.5	2.11	0.68	1.67	11.18	5.01	33.54	0.1	-0.4	1.48
2.56	0.18	11.5	2.24	0.7	1.61	11.86	4.82	35.51	0.1	-0.4	1.75
2.85	0.2	11.5	2.35	0.72	1.56	12.38	4.65	36.91	0.1	-0.4	2.01
3.12	0.22	11.5	2.44	0.73	1.51	12.74	4.49	37.87	0.13	-0.4	2.23
3.37	0.24	11.5	2.52	0.74	1.47	13.05	4.35	38.62	0.15	-0.4	2.43
3.6	0.25	11.5	2.58	0.74	1.43	13.27	4.21	39.08	0.17	-0.4	2.6

QUY CHUẨN - TIÊU CHUẨN

C_E	$t_{of}/W^{1/3}$ (ms/lb ^{1/3})	t_{of} (ms)	P_r (psi)	$0.25t_{of}$ (ms)
0.27	10.95	64.036	-0.5	16.01
0.27	10.89	72.901	-0.6	18.23
0.27	10.89	80.238	-0.69	20.06
0.27	10.89	86.434	-0.77	21.61
0.27	10.89	91.85	-0.84	22.96
0.27	10.89	96.693	-0.91	24.17
0.27	10.89	101.09	-0.97	25.27

Bảng 5. Tham số tải trọng động tác dụng lên nóc

L_{wf}/L	P_{sof} (psi)	P_{sof} (kG/cm ²)	C_E	P_{so} (psi)	$t_d/W^{1/3}$ (ms/lb ^{1/3})	t_d (ms)	$t_{of}/W^{1/3}$ (ms/lb ^{1/3})	t_{of} (ms)	q_0 (psi)	C_D	P_R (psi)
1.92	1.86	0.13	0.66	1.23	1.81	10.58	5.29	30.94	0.1	-0.4	1.19
2.11	2.23	0.16	0.68	1.52	1.67	11.18	5.01	33.54	0.1	-0.4	1.48
2.24	2.56	0.18	0.7	1.79	1.61	11.86	4.82	35.51	0.1	-0.4	1.75
2.35	2.85	0.2	0.72	2.05	1.56	12.38	4.65	36.91	0.1	-0.4	2.01
2.44	3.12	0.22	0.73	2.28	1.51	12.74	4.49	37.87	0.13	-0.4	2.23
2.52	3.37	0.24	0.74	2.49	1.47	13.05	4.35	38.62	0.15	-0.4	2.43
2.58	3.6	0.25	0.74	2.66	1.43	13.27	4.21	39.08	0.17	-0.4	2.6

C_E	$t_{of}/W^{1/3}$ (ms/lb ^{1/3})	t_{of} (ms)	P_r (psi)	$0.25t_{of}$ (ms)	t_d (ms)	t_o (ms)	$t_o + 0.25t_{of}$ (ms)	$t_o + t_{of}$ (ms)
0.27	10.95	64.04	-0.5	16.01	10.58	22.28	38.29	86.32
0.27	10.89	72.9	-0.6	18.23	11.18	24.37	42.6	97.27
0.27	10.89	80.24	-0.69	20.06	11.86	26.01	46.07	106.25
0.27	10.89	86.43	-0.77	21.61	12.38	27.38	48.99	113.81
0.27	10.89	91.85	-0.84	22.96	12.74	28.51	51.47	120.36
0.27	10.89	96.69	-0.91	24.17	13.05	29.57	53.74	126.26
0.27	10.89	101.09	-0.97	25.27	13.27	30.45	55.72	131.54

Bảng 6. Tính toán áp lực tác dụng lên tường sau

L_{wf}/L	P_{sob} (psi)	P_{sob} (kG/cm ²)	C_E	P_{so} (psi)	$t_d/W^{1/3}$ (ms/lb ^{1/3})	t_d (ms)	$t_{of}/W^{1/3}$ (ms/lb ^{1/3})	t_{of} (ms)	q_0 (psi)	C_D	P_R (psi)
1.35	1.86	0.13	0.55	1.02	2.73	15.97	6.03	35.26	0.1	-0.4	0.98
1.48	2.23	0.16	0.58	1.29	2.42	16.2	5.67	37.96	0.1	-0.4	1.25
1.57	2.56	0.18	0.59	1.51	2.18	16.06	5.34	39.35	0.1	-0.4	1.47
1.65	2.85	0.2	0.61	1.74	1.98	15.72	5.06	40.16	0.1	-0.4	1.7
1.71	3.12	0.22	0.62	1.93	1.84	15.52	4.83	40.74	0.1	-0.4	1.89
1.77	3.37	0.24	0.63	2.12	1.71	15.18	4.62	41.02	0.11	-0.4	2.08
1.81	3.6	0.25	0.64	2.3	1.61	14.95	4.45	41.31	0.13	-0.4	2.25

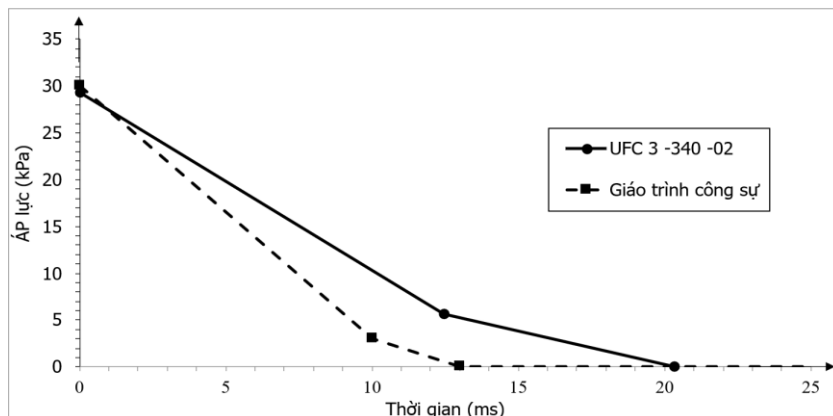
C_E	$t_{of}/W^{1/3}$ (ms/lb ^{1/3})	t_{of} (ms)	P_r (psi)	$0.25t_{of}$ (ms)
0.26	11.43	66.84	-0.48	16.71
0.26	11.3	75.65	-0.58	18.91
0.27	11.22	82.67	-0.69	20.67
0.27	11.15	88.5	-0.77	22.13

C_E	$t_{of}/W^{1/3}$ (ms/lb ^{1/3})	t_{of} (ms)	P_r (psi)	$0.25t_{of}$ (ms)
0.27	11.11	93.71	-0.84	23.43
0.27	11.06	98.2	-0.91	24.55
0.27	11.03	102.39	-0.97	25.6

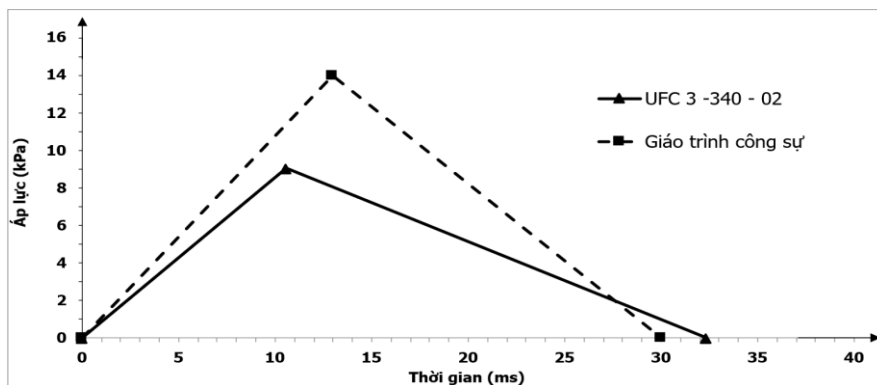
3.3 So sánh áp lực tác dụng lên công trình trong trường hợp lượng nổ 200 lbs

Trong trường hợp lượng nổ 200 lbs, các biểu đồ áp lực tác dụng lên tường trước, tường bên – nóc và

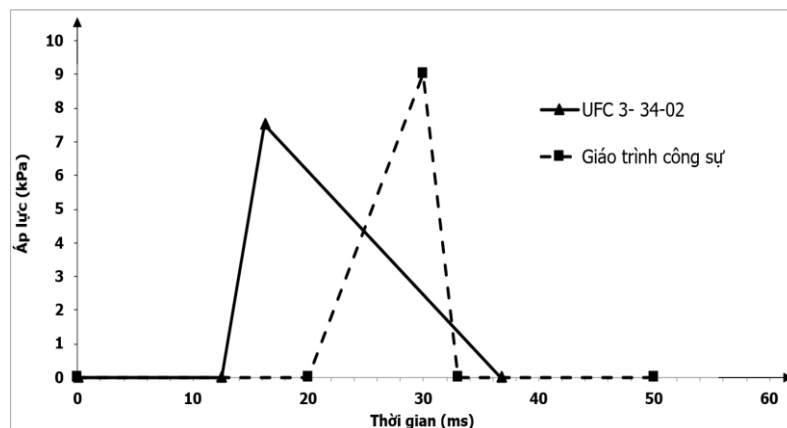
tường sau được thể hiện trong Hình 10, Hình 11, Hình 12. Để thuận lợi so sánh, các giá trị áp lực tính theo hai phương pháp trên được quy đổi về đơn vị kPa, và đơn vị thời gian là ms.



Hình 10. Biểu đồ áp lực – thời gian tác dụng lên tường trước



Hình 11. Biểu đồ áp lực – thời gian tác dụng lên tường bên và nóc



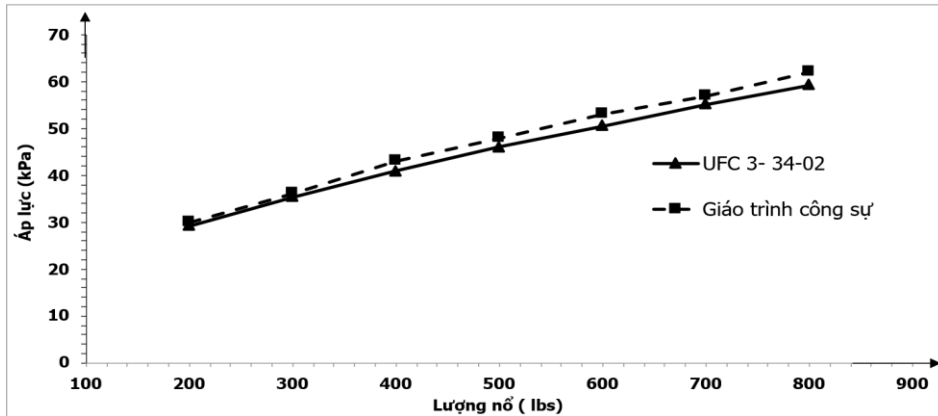
Hình 12. Biểu đồ áp lực – thời gian tác dụng lên tường sau

3.4 So sánh giá trị áp lực cực đại tác dụng lên tường trước công trình

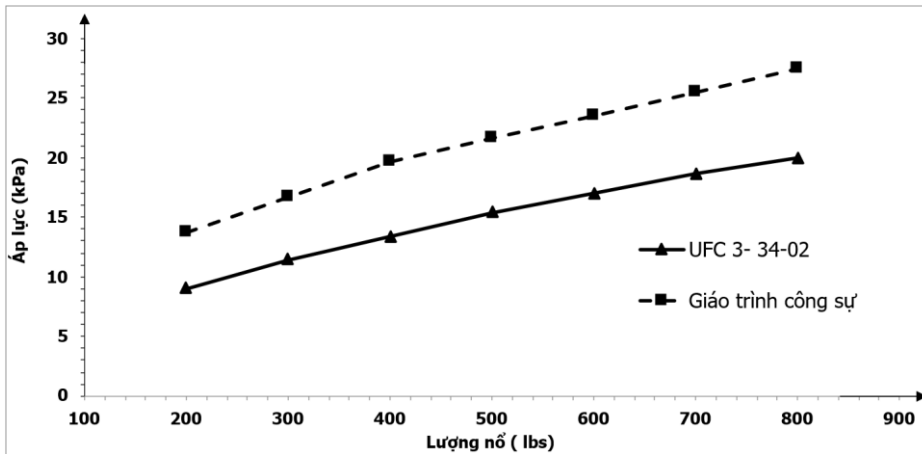
Thay đổi đương lượng nổ từ 200 lbs đến 800 lbs, các biểu đồ áp lực cực đại tác dụng lên tường trước,

tường bên – nóc và tường sau của hai phương pháp tính toán trên, thể hiện trong Hình 13, Hình 14, Hình

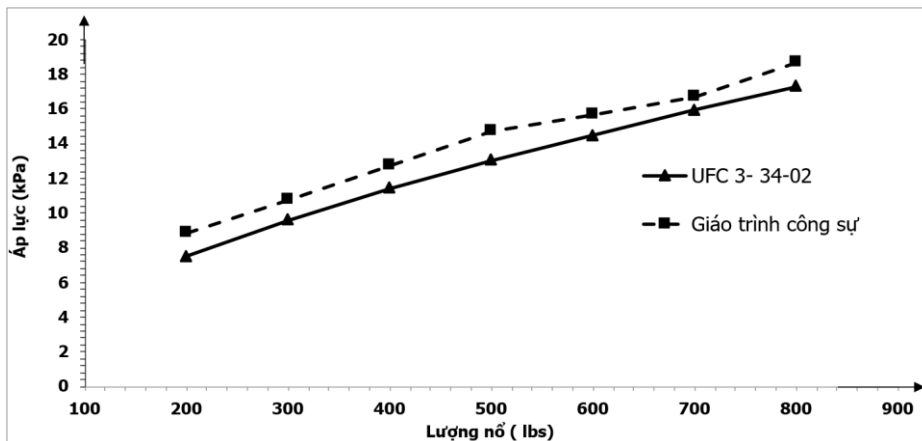
15. Để thuận lợi so sánh, các giá trị áp lực được quy đổi về đơn vị kPa, đơn vị thời gian ms.



Hình 13. So sánh áp lực cực đại tác động tới tường trước



Hình 14. So sánh áp lực cực đại tác động tới tường bên và nóc



Hình 15. So sánh áp lực cực đại tác động tới tường sau

3.5 Nhận xét

Từ các kết quả áp lực tính toán cụ thể ứng với lượng nổ từ 200 lbs tới 800 lbs và từ phương pháp tính toán tải trọng động theo hai tài liệu [7] và UFC 3-340-02, ta có nhận xét như sau:

- Về giá trị áp lực cực đại:

Cả hai phương pháp tính toán đều cho kết quả

đồng nhất với sai lệch dưới 10%. Điều này thể hiện dữ liệu về áp lực sóng tới và phản xạ khi nổ trên mặt đất là tương đồng. Qua các nghiên cứu trước đó, áp lực sóng tới công thức thực nghiệm của Sadvovskiy và Kingery-Bulmash rất tương đồng khi mô tả nổ tự do trong không khí. Tuy nhiên, khi tính tới áp lực tác động tới tường trước công trình, có sự sai lệch nhỏ (dưới 10%). Sự sai lệch ở đây là do công thức áp

dụng tải trọng nổ trên mặt đất của giáo trình công sự chấp nhận giả thiết lượng nổ bán cầu lý tưởng, quy đổi tính toán áp lực lượng nổ trên mặt đất tương đương 2 lần của đương lượng nổ tự do. Trong thực tế, do tiêu hao năng lượng vào phá hủy đất, giá trị này chỉ khoảng $1.8 \div 1.9$ lần và được đo đạc trực tiếp, cụ thể hơn trong các nghiên cứu thực nghiệm của UFC 3-340-02. Vì vậy biểu đồ áp lực tính theo tài liệu [7] sẽ lớn hơn. Điều này chứng minh rằng các công thức giải tích thực nghiệm của tài liệu [7] vẫn có độ tin cậy cao trong việc xác định đỉnh áp lực phản xạ tác dụng lên mặt trước công trình.

Tuy nhiên, các giả thiết đơn giản hóa khi tính toán áp lực động tác động lên tường bên và tường sau của tài liệu [7] dẫn tới sự khác biệt đáng kể với tiêu chuẩn Hoa Kỳ. Theo UFC 03-340-02, ngoài áp lực động do sóng tới gây ra, còn cần tính toán kỹ ảnh hưởng của hiện tượng clearing time, hiệu ứng gió động của luồng gió khí phía sau mặt sóng nổ. Nhìn chung, qua các khảo sát trên, có thể khẳng định các công thức của tài liệu [7] thiên về đơn giản hóa và an toàn trong khi các công thức của UFC 03-340-02 lại thiên về sự chính xác, tỉ mỉ do có rất nhiều số liệu thực nghiệm bổ sung.

- Về đặc điểm phân bố tải trọng trên các bề mặt:

+ Mặt trước: Phương pháp tính toán của tài liệu [7] đơn giản hơn, trong khi UFC 3-340-02 tính đến hiện tượng giải tỏa áp lực (clearing time). Khi sóng phản xạ tràn qua các mép công trình, áp lực sẽ giảm nhanh chóng về mức áp lực dư tương đương, giúp đánh giá chính xác hơn sự sụt giảm tải trọng theo thời gian;

+ Mặt bên, nóc và mặt sau: Đây là nơi thể hiện sự khác biệt lớn nhất (khoảng 25%). Tiêu chuẩn Hoa Kỳ (UFC) mô tả chi tiết quá trình sóng bao quanh công trình, tính đến hệ số kéo theo (drag coefficient) và sự biến đổi áp lực tại từng vị trí. Trong khi đó, tài liệu [7] thường đơn giản hóa hoặc đưa ra các hệ số bao quát, dẫn đến kết quả có phần thiên về an toàn.

- Về xung lực và pha âm:

+ Tiêu chuẩn Hoa Kỳ xét đến pha âm (giai đoạn áp lực thấp hơn áp lực khí quyển), điều này rất quan trọng khi tính toán các kết cấu nhạy cảm với sự thay đổi chiều tải trọng hoặc tính toán độ võng phục hồi. Tài liệu [7] hầu như bỏ qua giai đoạn này;

+ Xung lực (diện tích biểu đồ P-t) của UFC thường nhỏ hơn và sát với thực tế hơn, giúp tối ưu hóa kích thước cấu kiện so với cách tính của tài liệu [7].

- Khả năng ứng dụng và số hóa:

+ Phương pháp tính theo tài liệu [7] phù hợp cho việc tra cứu nhanh, tính toán thủ công hoặc kiểm tra sơ bộ;

+ Tiêu chuẩn UFC 3-340-02 với hệ thống dữ liệu số hóa Kingery-Bulmash là cơ sở lý tưởng để xây dựng các phần mềm tính toán tự động, việc số hóa dữ liệu từ UFC 3-340-02 không chỉ giúp tăng độ chính xác mà còn giúp giảm sai sót do con người khi phải tra bảng thủ công.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã hoàn thành việc xây dựng chương trình tính toán tự động và thực hiện so sánh chi tiết tải trọng sóng nổ theo hai hệ thống tài liệu tiêu biểu là tài liệu [7] và tiêu chuẩn UFC 3-340-02. Kết quả cho thấy, về giá trị áp lực phản xạ cực đại tác dụng lên mặt trước công trình, sự sai lệch giữa hai phương pháp là không đáng kể (dưới 10%), điều này khẳng định độ tin cậy nhất định của các công thức giải tích truyền thống trong việc xác định đỉnh áp lực. Tiêu chuẩn UFC 3-340-02 thể hiện ưu điểm vượt trội trong việc mô tả diễn biến tải trọng theo thời gian trên tất cả các bề mặt (tường bên, nóc, tường sau) nhờ tính đến hiện tượng giải tỏa áp lực và pha âm của sóng nổ. Vì vậy, tính toán theo tiêu chuẩn này sẽ có kết quả chi tiết, chính xác hơn. Tuy nhiên, việc tính tay theo UFC 3-340-02 là rất phức tạp và tiêu tốn thời gian. Vì vậy, bài báo phát triển chương trình số hóa dữ liệu, cho phép tự động tính toán áp lực theo cả 2 phương pháp trên. Kết quả khảo sát cho thấy sai lệch về áp lực cực đại giữa hai phương pháp trong khoảng từ 5% đến 25%, tùy theo từng vị trí; tuy nhiên có sự khác biệt rõ rệt về xung lực và biểu đồ thời gian duy trì tải trọng. Phương pháp tính của tài liệu [7] thường đưa ra kết quả thiên về an toàn do giả thiết lượng nổ bán cầu lý tưởng, bỏ qua dữ liệu thực tế do tiêu tán năng lượng của mặt đất. Trong khi đó phương pháp tính của UFC 3-340-02 cho phép xác định xung lực chính xác hơn, giúp tối ưu hóa việc thiết kế kết cấu chịu lực, mặc dù đã tính tới hệ số an toàn khi tính tải trọng nổ là 1,2.

Mặc dù có sự tương đồng về áp lực cực đại, nhưng kết quả tính toán chi tiết xung lực, năng lượng nổ, thời gian duy trì pha nén của giáo trình công sự và tiêu chuẩn UFC 3-340-02 có sự chênh lệch đáng kể. Thời điểm đến của sóng nổ bắt đầu tác động lên mặt sau, áp lực cực đại và xung lực tác dụng lên mặt sau theo giáo trình công sự rất đơn giản, và chưa tính đủ thời gian lan truyền, ảnh hưởng của hiệu ứng giải tỏa áp lực. Trong trường hợp này, để tính chính xác, khuyến nghị sử dụng kết quả thực nghiệm từ UFC.

Từ các phân tích trên, bài báo kiến nghị trong giai đoạn thực hành tính toán sơ bộ, hoặc cần đánh giá nhanh, các kỹ sư có thể sử dụng công thức giải tích theo tài liệu [7] để đảm bảo tính tiện dụng, kiểm tra. Tuy nhiên, đối với giai đoạn thiết kế kỹ thuật và thi công các công trình, việc áp dụng quy trình tính toán theo tiêu chuẩn UFC 3-340-02 là cần thiết để vừa đảm bảo an toàn, vừa tiết kiệm vật liệu và phản ánh đúng bản chất làm việc của kết cấu dưới tác động của tải trọng sóng nổ. Bài báo kiến nghị sử dụng dữ liệu và cách tính của UFC 03-340-02 để thiết kế chi tiết nhằm tối ưu chi phí và đảm bảo độ tin cậy cho các công trình phòng thủ dân sự tại Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. A. Sadovskiy (2004), “Mechanical effects of air shockwaves from explosions according to experiments”, Sadovskiy MA Selected Works: Geophysics and Physics of Explosion.
- [2] T. Ngo, P. Mendis, A. Gupta, and J. Ramsay (2007), “Blast Loading and Blast Effects on Structures – An Overview”, Electronic Journal of Structural Engineering, no. 1, pp. 76–91, Jan, doi: 10.56748/ejse.671.
- [3] A. Filice, M. Mynarz, and R. Zinno (2022), “Experimental and Empirical Study for Prediction of Blast Loads”, Applied Sciences, vol. 12, no. 5, p. 2691, Mar, doi: 10.3390/app12052691.
- [4] US Department of Defense (2020), “UFC-4-010-01, Minimum Antiterrorism Standards for Buildings, Standard”.
- [5] Federal Emergency Management Agency (2025), “FEMA 427. Risk Management Series Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks”, Washington, USA. Accessed: Oct. 01, 2025. [Online]. Available: www.fema.gov
- [6] Минстрой России (2022), “СП 88.13330.2022 Защитные сооружения гражданской обороны (СНУП II-11-77*) [Protective structures of civil defense]”, Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, Москва, Свод правил.
- [7] Nguyễn Trí Tá, Đặng Văn Đích, Vũ Đình Lợi (2008), *Giáo trình Công sự tập 1*. Hà Nội: Học viện Kỹ thuật Quân sự.
- [8] V. D. Hieu and B. V. Tuong (2026), “Analysis of Blast Loads on Structures with Facade Openings Using UFC 3-340-02”, *JST*, vol. 8, no. 2, Jan, doi: 10.56651/lqdtu.jst.v8.n2.1079.sce.
- [9] ABAQUS (2003), *Abaqus Theory Manual*.
- [10] C. Dynamics (2017), *AUTODYN Theory Manual Version 18.2*.
- [11] Ansys (1992), “LS-DYNA ® KEYWORD USER’S MANUAL VOLUME II Material Models”, [Online]. Available: <https://lsdyna.ansys.com>
- [12] U.S. Department of Defense (2014), “UFC 3-340-02, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions”, [Online]. Available: <http://dod.wbdg.org/>.
- [13] Ngô Ngọc Thủy, Đào Thanh Định (2016), *Xác định giá trị áp lực sóng nổ tác dụng lên công trình bằng phần mềm ansys autodyn 2D*, Tạp chí Xây dựng, tháng 9.
- [14] Ngô Ngọc Thủy, Hoàng Văn Tuấn, Nguyễn Vũ Hùng (2017), *Nghiên cứu ảnh hưởng của góc tới đến giá trị áp lực của sóng nổ tác dụng lên công sự bằng phần mềm ansys autodyn 3D*, Tạp chí Xây dựng, tháng 7.